Концепция выбора и обоснование характеристик системы мониторинга состояния насосного оборудования

В.Н. Костюков, А.П. Науменко, А.А. Ткаченко (на фото)

НПЦ «Динамика», г. Омск

В работе рассмотрены основные концепции выбора системы мониторинга технического состояния насосно-компрессорного оборудования (НКО) нефтеперерабатывающих производств различных категорий опасности по ГОСТ Р 53563-2009, обеспечивающие увеличение межремонтного пробега НКО и их безаварийную ресурсосберегающую эксплуатацию. Приведены основные принципы построения систем мониторинга и диагностики в реальном времени, характеристики аппаратных и программных средств систем на основе выбора и обоснования классификационных факторов согласно ГОСТ Р 53564-2009. Показано влияние величины риска пропуска отказа и его составляющих на класс системы.

Целью оснащения оборудования опасных производственных объектов (ОПО) системой комплексного мониторинга является обеспечение безопасной ресурсосберегающей эксплуатации оборудования путем заблаговременной выработки управляющих воздействий, которые должны обеспечить необходимый запас устойчивости технологической системы, качество ее функционирования, а также требуемый запас ее техногенной, экологической и экономической безопасности.

Системы мониторинга, реализующие эту цель путем получения в реальном времени оперативной информации о текущем и прогнозируемом технических состояниях оборудования ОПО, должны решать следующие задачи [1—4]:

— контроль и оценка технического состояния оборудования при приемочных испытаниях и в процессе эксплуатации различными видами (методами) неразрушающего контроля и технической

диагностики (виброакустический, акустико-эмиссионный, тепловизионный и др.);
— выявление дефектных узлов оборудования и причин возникновения дефектов и неисправностей [5];
— обеспечение ведения технологического режима объектов мониторинга с учетом их технического состояния;
— выявление необходимости регулирования параметров технологического процесса для минимизации деструктивных нагрузок, действующих на объект мониторинга, с целью обеспечения максимального ресурса безопасной эксплуатации оборудования;
— информирование о необходимости изменения периодичности проведения регламентных работ (для оборудования, находящегося в эксплуатации);
— обеспечение эксплуатации оборудования промышленных предприятий по фактическому состоянию, подразумевающему, что объемы и содержание штатных периодических осмотров и обследований объектов, снабженных системами мониторинга, могут быть изменены;
— информирование об условиях дальнейшей эксплуатации оборудования сверх нормативного срока эксплуатации.

Существующие сегодня системы мониторинга, разработанные за рубежом, построены на принципах, приведенных в стандартах ГОСТ Р ИСО 13379 [6], ГОСТ Р ИСО 17359 [7]. Для определения возможных неисправностей оборудования, их признаков и параметров, которые необходимо измерять с целью выявления существующих или зарождающихся повреждений, рекомендуется использовать методы анализа признаков видов отказов (FMSA) [6], анализа видов и последствий отказов (FMEA) [8] или анализа видов, последствий и критичности отказов (FMECA) [9].

Методы FMEA и FMECA позволяют получить информацию о диапазоне изменения характеристик, измеряемых для выявления отказов конкретных видов. В качестве таковых обычно используют параметры, изменение которых позволяет судить о наличии неисправностей, или функции (например, кривую «давление—расход» для насоса или компрессора, кривую «давление—объем» для двигателей внутреннего сгорания, а также другие зависимости, характеризующие производительность машины).

Анализ признаков видов отказов (FMSA) дает возможность решить задачи выбора технологии и стратегии мониторинга, позволяющих максимизировать доверительный уровень диагноза и прогноза отказа

данного вида, получить информацию и представить ее в соответствующей форме. Основными этапами данного метода являются:

— составление перечня обследуемых узлов машины;
— составление перечня возможных видов отказов каждого узла;
— составление перечня последствий отказа каждого вида;
— составление перечня причин отказа каждого вида;
— составление перечня диагностических признаков, характерных для отказа каждого вида;
— ранжирование видов отказов по способности обнаружения, критичности, доверительным уровням диагноза и прогноза и составление на этой основе показателя приоритетности мониторинга;
— составление перечня возможных методов мониторинга;
— оценка необходимой частоты проведения измерений;
— составление перечня дополнительных методов контроля;
— оценка необходимой частоты проведения измерений при применении дополнительных методов контроля.

Ранжирование по способности обнаружения (DET)

Результат ранжирования должен отражать ограничения применимости диагностических признаков для отказов данного вида.

Показателю DET присваивают значения в диапазоне от 1 до 5 в зависимости от способности обнаружить отказ данного вида безотносительно к точности последующих диагноза и прогноза:

DET = 1 — существует лишь **незначительная** вероятность обнаружения отказа данного вида;

DET = 2 — существует **низкая** вероятность обнаружения отказа данного вида;

DET = 3 — существует **средняя** вероятность обнаружения отказа данного вида;

DET = 4 — существует **высокая** вероятность обнаружения отказа данного вида;

DET = 5 — отказ данного вида будет обнаружен **достоверно**.

Ранжирование по критичности отказа (SEV)

Данный вид ранжирования предназначен для оценки отдельных видов отказов по связанным с ними рискам:

SEV = 1 — отказ и его последствия могут понизить способность технологической системы выполнять свои функции, приводят к незначительным нарушениям в системе или к ущербу окружающей среде без опасности для жизни и риска получения травм;

SEV = 2 — отказ и его последствия снижают способность технологической системы выполнять свои функции, но не сопровождаются существенными нарушениями системы и не связаны с опасностью для жизни и риском получения травм;

SEV = 3 — отказ и его последствия способны привести к невозможности выполнения технологической системой ее основных функций, к серьезным нарушениям системы или к ущербу окружающей среде с незначительной опасностью для жизни и незначительным риском получения травм;

SEV = 4 — отказ и его последствия способны привести к невозможности выполнения технологической системой ее основных функций, к серьезным нарушениям системы или к ущербу окружающей среде с высокой опасностью для жизни и высоким риском получения травм.

Ранжирование по доверительному уровню диагноза (DGN)

Ранжирование по ожидаемой точности диагноза (показателю DGN) в пределах от 1 до 5 позволяет выявить виды отказов, для которых диагностические признаки:

— поддаются выявлению, но обладают плохой повторяемостью;

— неизвестны;

— неразличимы среди диагностических признаков отказов других видов.

Показателю DGN присваивают следующие значения:

DGN = 1 — вероятность правильного диагноза отказа данного вида **незначительна**;

DGN = 2 — существует **низкая** вероятность правильного диагноза отказа данного вида;

DGN = 3 — существует **средняя** вероятность правильного диагноза отказа данного вида;

DGN = 4 — существует **высокая** вероятность правильного диагноза отказа данного вида;

DGN = 5 — диагноз отказа данного вида будет поставлен **достоверно**.

Ранжирование по доверительному уровню прогноза (PGN)

Ранжирование по ожидаемой точности прогноза (показателю PGN) в пределах от 1 до 5 позволяет выявить виды отказов, для которых:

— диагностические признаки поддаются выявлению, но обладают плохой повторяемостью;

— диагностические признаки нечувствительны к развитию неисправностей;

— неизвестна скорость развития неисправностей;

— диагностические признаки неразличимы среди диагностических признаков отказов других видов.

Показателю PGN присваивают следующие значения:

PGN = 1 — вероятность точного прогноза отказа данного вида **незначительна**;

PGN = 2 — существует **низкая** вероятность точного прогноза отказа данного вида;

PGN = 3 — существует **средняя** вероятность точного прогноза отказа данного вида;

PGN = 4 — существует **высокая** вероятность точного прогноза отказа данного вида;

PGN = 5 — прогноз отказа данного вида будет **достоверным**.

Показатель приоритетности мониторинга (MPN)

Данный параметр является произведением показателей, определенных выше, и дает обобщенную характеристику отказу каждого вида. Чем выше показатель приоритетности мониторинга MPN, тем в большей степени выбранный метод мониторинга пригоден для обнаружения, диагностирования и прогнозирования отказа данного вида.

Однако низкое значение показателя приоритетности мониторинга свидетельствует не столько о том, что он является необязательным, сколько о том, что данный метод мониторинга с выбранными интервалами между измерениями не способен обеспечить обнаружение неисправности, диагностирование и прогнозирование с высокой достоверностью.

Наихудшим случаем является высокая критичность отказа данного вида при низких значениях показателей способности его обнаружения, доверительных уровней диагноза и прогноза. Наиболее бла-

гоприятный случай — это низкая критичность отказа данного вида, сопровождающаяся легкостью его обнаружения, когда разным степеням развития повреждений соответствуют известные области значений диагностических признаков, что обеспечивает высокую достоверность диагноза и прогноза.

Необходимо понимать, что системы мониторинга, разработанные согласно требованиям этого стандарта, который является аутентичным соответствующему стандарту ИСО, во-первых, построены на основе критериев и принципов, которые представляются весьма субъективными, а используемые показатели имеют достаточно большую неопределенность и в значительной степени зависят от индивидуальных особенностей оборудования, а во-вторых, не отвечают требованиям российских стандартов [1, 2], в которых указанные недостатки отсутствуют.

В российских стандартах ГОСТ Р 53563 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации» [1] и ГОСТ Р 53564 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга» [2] приведены инвариантные принципы обоснования применения системы мониторинга, выбора и обоснования ее характеристик для разнообразных типов динамического и статического оборудования.

Категория оборудования при выборе объектов мониторинга устанавливается на основе анализа матрицы риска согласно [10] и определяется уровнем потерь при его отказе, который должна предотвратить система мониторинга:

«***B***» — высокая величина риска и потерь: оборудование 1-й категории опасности, занимающее ключевые позиции в технологическом процессе и определяющее безопасность производства, внезапный отказ которого может привести к инциденту, техногенной аварии (взрыву, пожару) и/или существенному снижению технико-экономических показателей производства, существенным экологическим последствиям, смерти и травматизму людей. Для получения объективных данных о состоянии оборудования 1-й категории его необходимо оснастить стационарной системой мониторинга с автоматической экспертной системой поддержки принятия решений и подключить к автоматической диагностической сети для представления информации о состоянии объектов мониторинга ответственному персоналу в реальном времени, что исключит фактор внезапности отказов, субъективизм персонала в процессе принятия

решений и обеспечит объективный контроль его исполнительской дисциплины.

«***С***» — средняя величина риска и потерь: оборудование 2-й категории опасности, влияющее на безопасность производства, внезапный отказ которого может привести к инциденту, снижению безопасности и технико-экономических показателей производства, экологическим последствиям и травматизму людей, также оснащается стационарной системой мониторинга.

«***М***» — малая величина риска и потерь: оборудование 3-й категории опасности, внезапный отказ которого может привести к повышенным затратам на ремонт, снижению безопасности и технико-экономических показателей производства, локальным экологическим последствиям в пределах производства и единичному травматизму. Для сокращения затрат на ремонты может диагностироваться мобильными системами мониторинга с интеграцией результатов в диагностическую сеть для выработки и реализации решений по ближайшим неотложным действиям в целях сокращения эксплуатационных затрат и контроля их выполнения.

«***Н***» — незначительная величина риска и потерь: оборудование 4-й категории опасности, внезапный отказ которого может привести к локальным нарушениям в пределах отказавшего оборудования, может оцениваться визуально-измерительным или иным методом неразрушающего контроля (МНК) с периодом, достаточным для своевременной замены.

Таким образом, выбор объектов мониторинга определяется путем анализа матрицы риска производственного комплекса (рис. 1), принимая во внимание воздействие их отказа на технологический процесс и безопасность производства.

Количественная оценка риска требует анализа частот (вероятности) отказов оборудования и вызываемых этим последствий (потерь). Для оценки частоты отказов используют, как правило, статистические данные эксплуатации, приведенные в справочниках, нормативных документах, эксплуатационных журналах или отчетах по надежности оборудования конкретного предприятия или компании, на которых планируется установить систему мониторинга. Анализ последствий (потерь) в результате отказа оборудования включает потери:

— экономические, связанные с полной или частичной утратой объекта;

— экологические, с существенным или незначительным нанесением вреда окружающей среде;

Вероятность отказа оборудования	Потери вследствие пропуска отказа системой мониторинга		Техногенная опасность
Высокая	**I** (80–90) % ТЭП	**II** (20–10) % ТЭП	Есть
Низкая	**III** Небольшие (рост затрат на ремонт)	**IV** Незначительные (затраты на ремонт)	Нет

Рис. 1. Матрица рисков

— нарушение безопасности жизнедеятельности с нанесением ущерба жизни и/или здоровью людей.

Стандарт ГОСТ Р 53564 [2] определяет требования к системам мониторинга и область их применения:

— системы 1-го класса используются для комплексного мониторинга технологической установки, включая установки 1-, 2- и 3-й категорий, в которых имеется возможность автоматической блокировки опасных установок, и обеспечивают безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию;

— системы 2-го класса предназначены для мониторинга оборудования 2-й и 3-й категорий с возможностью автоматической блокировки опасных установок и обеспечивают безопасную ресурсосберегающую его эксплуатацию по фактическому техническому состоянию;

— системы 3-го класса применяются для мониторинга оборудования 3-й категории по фактическому техническому состоянию;

— системы 4-го класса носят вспомогательный характер.

Для реализации автоматизированных систем управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования необходимо построение системы мониторинга с использованием ряда принципов и следующих наиболее важных свойств и характеристик [2, 3]:

1) количество и вид используемых МНК;

2) тип экспертной системы;

3) объем выявляемых неисправностей;

4) величина ошибки статического распознавания состояния оборудования;
5) величина ошибки динамического распознавания состояния оборудования;
6) величина риска пропуска опасного состояния оборудования;
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 мониторинга, с целью 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 выделяется несколько уровней, оцениваемых в баллах от 2 до 4 (табл. 1). В приведенной таблице расчет классов систем приведен для объектов технического регулирования (ОТР), опасных производственных объектов (ОПО), критически (КВО) и стратегически важных (СВО) объектов.

Для обеспечения безаварийной и безопасной эксплуатации оборудования необходимо прежде всего выбрать допустимый риск пропуска отказа, который определяется величинами ошибок систем мониторинга.

Периодичность получения информации о техническом состоянии оборудования ОПО определяется скоростью развития в нем неисправностей, и для обеспечения наблюдаемости состояния она должна быть в несколько раз меньше продолжительности развития неисправности в объектах мониторинга до предельного состояния. Поэтому введено понятие ошибки динамического распознавания опасного состояния оборудования (динамической ошибки), под которой понимают пропуск своевременного распознавания опасного состояния оборудования, вызванный тем, что период мониторинга (диагностирования) превышает интервал развития неисправности от момента ее обнаружения до предельного состояния оборудования, и определены количественные требования к ее величине.

Динамическая ошибка обуславливается характеристиками системы мониторинга и может быть определена по интервалу постановки

Таблица 1

Примеры расчета класса систем

№	Вид классификации	Параметры классификации (R_i)	Номер системы						
			1	2	3	4	5	6	7
1	По количеству и виду МНК	Комплексные, специализированные ($R_1 = 1, 2$)	1	1	1	1	1	1	2
2	По типу экспертной системы	ЭСППР, ЭСД, СИС ($R_2 = 1, 2, 3$)	1	1	1	1	2	2	3
3	По объему неисправностей	Широкого класса или узкого ($R_3 = 1, 2$)	1	1	1	1	2	2	2
4	По ошибке статического распознавания	Низкая, средняя, высокая ($R_4 = 1, 2, 3$)	1	1	1	1	1	1	1
5	По ошибке динамического распознавания	Низкая, средняя, высокая ($R_5 = 1, 2, 3$)	1	1	1	1	1	2	3
6	По риску пропуска опасного состояния	Низкая, средняя, высокая ($R_6 = 1, 2, 3$)	1	2	3	2	2	3	3
7	По числу измерительных каналов	Многоканальные, одноканальные ($R_7 = 1, 2$)	1	1	1	1	1	1	2
8	По способу опроса датчиков	Универсальные, параллельные, последовательные ($R_8 = 1, 2, 3$)	1	1	1	1	1	2	3
9	По архитектуре	Распределенные, сосредоточенные ($R_9 = 1, 2$)	1	1	1	1	1	1	2
10	По типу анализатора сигналов	Векторный, скалярный ($R_{10} = 1, 2$)	1	1	1	1	1	1	1
11	По типу индикатора состояния	Комплексные, многоуровневые, простые ($R_{11} = 1, 2, 3$)	1	1	1	1	2	2	1

Таблица 1 (продолжение)
Примеры расчета класса систем

№	Вид классификации	Параметры классификации (R_i)	Номер системы						
			1	2	3	4	5	6	7
12	По наличию диагностической сети	Автоматические, ручные, нет (R_{12} = 1, 2, 3, 4)	1	1	1	2	2	2	1
13	По типу управления	Автоматические, автоматизированные, ручные (R_{13} = 1, 2, 3)	1	1	1	1	1	2	2
		Произведение $\prod R_i$	1	2	3	4	32	384	2592
14	ОТР	$\log_{10}(\prod R_i) = \lg(\prod R_i)$	0	0,3	0,5	0,6	1,5	2,6	3,4
15		Класс (K)	1	1	1	1	2	3	4
16	ОПО	$\log_6(\prod R_i) = \lg(\prod R_i)/0{,}77$	0	0,4	0,6	0,8	1,9	3,4	4,4
17		Класс (K)	1	1	1	1	2	4	5
18	КВО	$\ln(\prod R_i) = \lg(\prod R_i)/0{,}43$	0	0,7	1,1	1,4	3,5	5,6	7,9
19		Класс (K)	1	1	2	2	4	6	8
20	СВО	$\log_2(\prod R_i) = \lg(\prod R_i)/0{,}3$	0	1	1,6	2	5	8,6	11
21		Класс (K)	1	2	2	3	6	9	12

диагноза состояния оборудования. В первом приближении при определенных условиях этот интервал может быть оценен по периоду измерений параметров с каждого датчика.

Более сложным является определение ошибки статического распознавания опасного состояния оборудования (статической ошибки), которая определяет вероятность пропуска своевременного распознавания опасного состояния оборудования, вызванного тем, что неисправное состояние оборудования система воспринимает (диагностирует) как исправное.

Фактически если система мониторинга определяет 9 из 10 отказов, которые могут привести к внезапной остановке оборудования и аварийной ситуации, то вероятность пропуска отказа составляет 10 %, а соответственно, ошибка статического распознавания опасного

состояния оборудования — 10 %. Кроме этого, на величину ошибки статического распознавания влияет и погрешность определения текущего значения диагностического признака неисправности, которая обусловлена погрешностью измерения системой мониторинга его величины.

Перечень отказов должен составляться на основе анализа надежности конкретного вида оборудования. С этой целью для анализа и управления в сфере мониторинга надежности оборудования, оснащаемого системами мониторинга, на предприятии должно функционировать подразделение (служба) мониторинга надежности оборудования, которое должно быть неотъемлемой частью его общей системы менеджмента [11].

Совокупный риск пропуска опасного состояния оборудования (r) определяется совокупностью статической (S), динамической (d) ошибок и влияния человеческого фактора (h), обусловленного несвоевременным выполнением персоналом предписаний системы мониторинга по устранению обнаруженного системой опасного состояния оборудования.

Допустимая ошибка системы мониторинга (η) при требуемом риске (ρ) пропуска опасного состояния оборудования (отказа) и фактической вероятности отказа оборудования (Q) определяются выражением

$$\eta = \frac{\ln(1-r)}{\ln(1-r) + \ln(1-Q)'}. \qquad (1)$$

при $r << Q << 1$, $\eta = r/Q$.

Связь между наработками на отказ при существующей (Q) и требуемой (r) вероятностях отказа показана на рис. 2.

Зависимость коэффициента увеличения временного интервала $k_T = T_r/T_Q$ между внезапными необнаруженными отказами агрегатов после (T_r) и до (T_Q) внедрения системы мониторинга от суммарной ошибки системы мониторинга (η) определяется по формуле [12] (рис. 3)

$$k_T = \frac{1}{\eta} - 1. \qquad (2)$$

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.

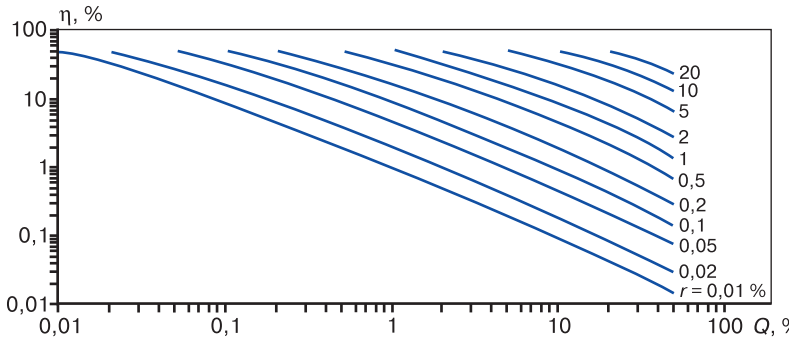


Рис. 2. Связь между наработками на отказ при существующей (*Q*) и требуемой (*r*) вероятностях отказа

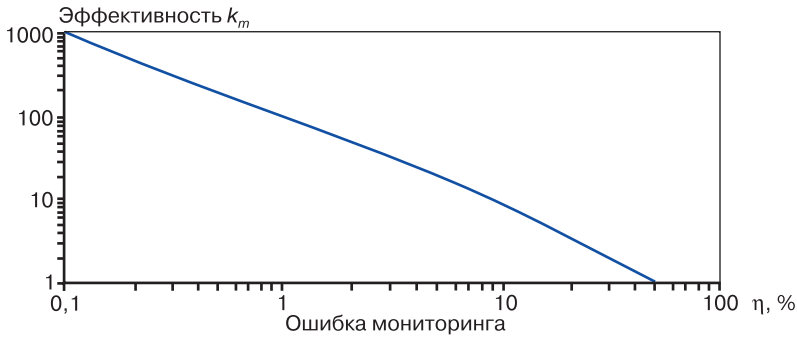


Рис. 3. Увеличение наработки между отказами

Даже при суммарной ошибке мониторинга в 30 % выигрыш составляет не менее 2 раз.

Наиболее сложной проблемой при реализации системы мониторинга, как показывает практика, является уменьшение риска пропуска опасного состояния оборудования (*r*), представляющего собой совокупность ошибок системы мониторинга (η) и человеческого фактора (*h*). В свою очередь величина η определяется статической (*S*) и динамической (*d*) ошибками:

$$r = 1 - (1 - S)(1 - d)(1 - h). \qquad (3)$$

Необходимо отметить, что ошибка из-за влияния человеческого фактора аналогична динамической ошибке, поскольку увеличивает

интервал запаздывания адекватной реакции персонала на предупреждения системы мониторинга. Опасное состояние оборудования может быть предотвращено персоналом, если предупреждения системы мониторинга доводятся неукоснительно, без задержки, независимо от его воли и желаний, а иногда, если необходимо, то и принудительно — через управляющее воздействие руководителя более высокого уровня управления. Именно для этого системы мониторинга 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 ($r < 5$ %) невозможно. 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 ли он или нет критического значения [13]. 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 изменяется во времени. В этом случае наличие ошибки статического распознавания приводит к неопределенности оценки 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 веро-

ятностью своевременного покрытия интервалом мониторинга (τ) моментов наступления состояний «Требует принятия мер» (ТПМ) t_T и «Недопустимо» (НДП) t_H на интервале развития неисправности T_H и равна [12, 14]

$$d = \tau / T_H.$$

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 динамическая ошибка резко возрастает вследствие запаздывания момента времени правильного распознавания состояния ТПМ (t_{TS}) и НДП (t_{HS}) на интервалы τ_T и τ_H соответственно:

$$\begin{gathered} d_0 = d + d_S, \quad d_S = d_{ST} + d_{SH}, \\ d_{ST} = \frac{\tau_T}{T_H}, \qquad d_{SH} = \frac{\tau_H}{T_H}. \end{gathered} \tag{4}$$

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

$$\begin{gathered} d_{STL} = \frac{S}{1-S}\frac{1}{G-1}, \qquad d_{SHL} = \frac{S}{1-S}\frac{G}{G-1}, \\ d_{SL} = \frac{S}{1-S}\frac{G+1}{G-1}, \end{gathered} \tag{5}$$

где S — вероятность ошибки статического распознавания; G — отношение уровня диагностического признака «Останов» при достижении состояния НДП к уровню диагностического признака «Предупреждение» при достижении состояния ТПМ; d_{STL} и d_{SHL} — увеличение динамических ошибок определений состояний ТПМ и НДП при линейном тренде соответственно; d_{SL} — повышение суммарной динамической ошибки при линейном тренде.

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

$$d_{SHL} = G d_{STL}. \tag{6}$$

Для трендов экспоненциального типа

$$Y = A\exp(\alpha t),$$

$$Y' = \alpha A\exp(\alpha t).$$

Увеличения динамических ошибок определения состояний ТПМ (d_{STE}) и НДП (d_{SHE}) оказываются равны между собой:

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

Увеличение суммарной динамической ошибки при экспоненциальном тренде составит

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

Анализ соотношений величин пороговых уровней по параметрам вибрации (табл. 2—5), приведенных в наиболее часто используемых стандартах [15—19], показывает, что величина G изменяется в пределах от 1,23 до 2,25 (наиболее часто G = 1,25 и 1,6. В табл. 6 приведены зна-

Таблица 2

Границы зон для машин различных классов [15]

$v_{r.m.s.}$, м/с	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	G
0,28	*A*	*A*	*A*	*A*	–
0,45					1,61
0,71					1,58
1,12	*B*				1,58
1,8		*B*			1,61
2,8	*C*		*B*		1,56
4,5		*C*		*B*	1,61
7,1	*D*		*C*		1,58
11,2		*D*		*C*	1,58
18			*D*		1,61
28				*D*	1,56
45					1,61

Таблица 3

Границы зон вибрационного состояния для машин номинальной мощностью от 15 до 300 кВт и высотой оси вращения вала от 160 до 315 мм [16]

Класс опоры	Граница зон	$d_{r.m.s.}$, мкм	G для $d_{r.m.s.}$	$v_{r.m.s.}$, мм/с	G для $v_{r.m.s}$
Жесткие	*A/B*	22	–	1,4	–
	B/C	45	2,05	2,8	2,00
	C/D	71	1,58	4,5	1,61
Податливые	*A/B*	37	–	2,3	–
	B/C	71	1,92	4,5	1,96
	C/D	113	1,59	7,1	1,58

Таблица 4

Границы зон вибросостояния для насосов центробежного типа со смешанными или осевыми потоками, раздельным приводом и номинальной мощностью более 15 кВт [16]

Класс опоры	Граница зон	$d_{r.m.s.}$, мкм	G для $d_{r.m.s.}$	$v_{r.m.s.}$, мм/с	G для $v_{r.m.s}$
Жесткие	*A/B*	18	–	2,3	–
	B/C	36	2,00	4,5	1,96
	C/D	56	1,56	7,1	1,58
Податливые	*A/B*	28	–	3,5	–
	B/C	56	2,00	7,1	2,03
	C/D	90	1,61	11,0	1,55

чения дополнительных динамических погрешностей для линейных и экспоненциальных трендов при крайних значениях $G = 1{,}25$ и 1,6 (в процентах от интервала развития неисправностей T_H от состояния ТПМ до состояния НДП). При $G = 1{,}6$ дополнительная динамическая ошибка (d_S) может превышать статическую более чем в 9 раз.

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 $S = 1$ % (уровень фактора $R_4 = 1$) дополнительная динамическая ошибка оценки состояния НДП $d_{SHL} > 5$ %. Учитывая выражение для риска про-

Таблица 5

Границы зон вибрационного состояния для оборудования различных видов [17]

Параметр	Границы зон	Насос						Электродвигатель					
		Мощность, кВт						Высота оси вала, мм					
		< 50		< 200		> 200		< 132		< 225		< 400	
$a_{r.m.s.}$, м/с^2	*A/B*	6,5	*G*	9	G	13,5	*G*	6,5	*G*	9	*G*	13,5	*G*
	B/C	8	1,23	12	1,33	16	1,19	8	1,23	12	1,33	16	1,19
	C/D	12	1,50	16	1,33	24	1,50	12	1,50	16	1,33	24	1,50
$v_{r.m.s.}$, мм/с	*A/B*	2,8		4,1		5,4		2,8		4,5		7,1	
	B/C	6,3	2,25	8,7	2,12	11,2	2,07	4,5	1,61	7,1	1,58	11,2	1,58
	C/D	8,7	1,38	11,2	1,29	14,1	1,26	7,1	1,58	11,2	1,58	18	1,61
$d_{r.m.s.}$, мкм	*A/B*	9		14,1		18		9		18		28	
	B/C	18	2,00	28	1,99	36	2,00	14,1	1,57	28	1,56	36	1,29
	C/D	28	1,56	36	1,29	45	1,25	23	1,63	36	1,29	57	1,58

Таблица 6

Значения дополнительных динамических погрешностей для линейных и экспоненциальных трендов при крайних значениях *G*

Статическая ошибка *S*, %	0,25		0,5		1,0		5,0	
G	1,25	1,6	1,25	1,6	1,25	1,6	1,25	1,6
Экспоненциальный тренд, дополнительная динамическая ошибка оценки момента НДП, d_{SHE}, %	1,12	0,53	2,25	1,06	4,52	2,13	23,5	11,1
Линейный тренд, дополнительная динамическая ошибка оценки момента НДП d_{SHL}, %	1,25	0,67	2,51	1,34	5,05	2,69	26,5	14,0
Экспоненциальный тренд, общая дополнительная динамическая ошибка d_{SE}, %	2,24	1,06	4,49	2,12	9,03	4,26	47,1	22,2
Линейный тренд, общая дополнительная динамическая ошибка d_{SL}, %	2,26	1,09	4,52	2,18	9,09	4,38	47,4	22,8

пуска 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 системы мониторинга для ОПО равен 1, для КВО — 2, а для СВО — 3.

Если $S = 5$ % ($R_4 = 2$), общая динамическая ошибка для трендов обоих типов при $G = 1{,}25$ превышает 30 %. Учитывая выражение (3) для риска пропуска опасного состояния, значение r 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 системы мониторинга для ОПО равен 2, для КВО — 3, а для СВО — 5. Такую систему мониторинга можно использовать для оборудования 2-й категории ОПО и не рекомендуется применять для оборудования КВО и СВО!

Выводы

1. Концепция выбора систем мониторинга оборудования опасных производственных объектов должна основываться на критериях, изложенных в ГОСТ Р 53563 [1], ГОСТ Р 53564 [2];

2. Необходимо помнить, что основным фактором, который наиболее сложно оценить и подтвердить, является риск пропуска внезапного отказа [2, 3]. Составляющие данного фактора должны быть обоснованы путем теоретических расчетов и подтверждены результатами практических исследований.

3. На величину риска пропуска отказа влияют не только факторы, непосредственно определяющие его величину, но и такие важные свойства системы мониторинга, как наличие автоматической экспертной системы, т.е. автоматического диагностирования, которое осуществляется без участия человека, поскольку этим определяется величина влияния человеческого фактора. С этим же связано обеспечение функционирования системы мониторинга в реальном времени, т.е. диагноз должен устанавливаться в темпе проведения измерений, а он, в свою очередь, должен соответствовать динамической ошибке распознавания опасного состояния оборудования. Под этой величиной понимают пропуск своевременного распознавания опасного состояния оборудования, вызванный тем, что период мониторинга (диагностирования) превышает интервал развития неисправности от момента ее обнаружения до предельного состояния оборудования.

4. Следует понимать, что наличие любой системы мониторинга, даже такой, которая определяет неисправное состояние с вероятностью более 50 %, повышает коэффициент увеличения наработки меж-

ду внезапными необнаруженными отказами агрегатов, а при $\eta = 4$ % k_T повышается в 24 раза.

5. Необходимо учитывать, что величина G — отношение уровня диагностического признака «Останов» при достижении состояния «Недопустимо» к уровню диагностического признака «Предупреждение» при достижении состояния «Требует принятия мер» — ужесточает требования к полноте обследования данным методом диагностики, а это, в свою очередь, уменьшает количество неисправностей и дефектов, которые система мониторинга не обнаруживает.

Так, если статическая ошибка распознавания опасного состояния оборудования, определяющая вероятность пропуска своевременного распознавания опасного состояния оборудования, вызванного тем, что неисправное состояние оборудования система воспринимает (диагностирует) как исправное, составляет 0,5 %, то это означает, что из 200 неисправностей и дефектов, которые выявляются данным методом диагностики, не будет продиагностирован всего один!

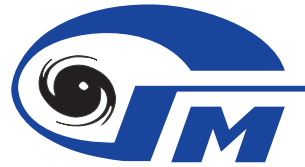
6. Решение вопросов, связанных с безопасной эксплуатацией оборудования, неразрывно связано с функционированием процесса беспристрастного анализа надежности его работы. Обеспечение этого процесса должно быть возложено на группу грамотных в данной области специалистов, которые должны быть выделены в отдельное подразделение или даже службу мониторинга надежности оборудования [1, 4].

7. Выполнение в полном объеме требований российских государственных и отраслевых стандартов [1—4, 17, 18] позволяет вполне легитимно перейти на эксплуатацию оборудования и объектов опасных производств по фактическому техническому состоянию.

Литература

1. ГОСТ Р 53563-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
2. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. М.: Стандартинформ, 2010. 20 с.
3. 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. 42 с.
4. СТО-03-002-08 Мониторинг оборудования опасных производств. Поря-

док организации: Сб. стандартов НПС «РИСКОМ» // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М., 2008. С. 25—63.
5. *Костюков В.Н., Науменко А.П.* Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: Учеб. пос. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.
6. ГОСТ Р ИСО 13379-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Руководство по интерпретации данных и методам диагностирования.
7. ГОСТ Р ИСО 17359-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство по организации контроля состояния и диагностирования.
8. МЭК 60812:2006 Методы анализа надежности систем. Метод анализа видов и последствий отказов (FMEA).
9. BS 5760-5:1991 Надежность систем, оборудования и компонентов. Руководство по анализу видов, последствий и критичности отказов (FMEA и FMECA).
10. ГОСТ Р 51901.1-2002 Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
11. ГОСТ Р 51901.2-2005. Менеджмент риска. Системы менеджмента надежности.
12. *Костюков В.Н.* Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
13. *Загоруйко Н.Г.* Методы распознавания и их применение. М.: Советское радио, 1972. 206 с.
14. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций / Под ред. А.А. Свешникова. М.: Наука, 1970. 656 с.
15. ГОСТ Р ИСО 10816-1-97. Вибрация. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях. Общие требования.
16. 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 15000 мин$^{-1}$.
17. ГОСТ Р 53565-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
18. 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. 24 с.
19. ГОСТ 20815-93 (МЭК 34-14-82). Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерение, оценка и допустимые значения.



Совет главных механиков
нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий
России и стран СНГ

Ассоциация нефтепереработчиков и нефтехимиков

ООО «НТЦ при Совете главных механиков»

Материалы семинара

Повышение надежности насосного оборудования

Анализ существующих насосных систем

Основные концепции проектирования и выбора насосного оборудования для нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств

Москва
2014 г.

УДК 621.65; 621.67

Повышение надежности насосного оборудования. Анализ существующих насосных систем. Основные концепции проектирования и выбора насосного оборудования для нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств: Материалы семинара. — М.: ООО «НТЦ при Совете главных механиков», 2014. — 200 с.

Представлены избранные доклады участников семинара «Повышение надежности насосного оборудования. Анализ существующих насосных систем. Основные концепции проектирования и выбора насосного оборудования для нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств», прошедшего в период с 18 по 21 февраля 2014 г. под эгидой Совета главных механиков нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий России и стран СНГ.

Сборник подготовили:

Составитель Белоусов Ю.Л.

Редактор Кудинова А.А.

Дизайн и верстка Лёгкая Е.А.

© Совет главных механиков нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий России и стран СНГ, 2014

© ООО «НТЦ при Совете главных механиков», 2014

ООО «Флоусерв»

Тел./факс: (495) 781-59-79

Кузенков Николай Владимирович	генеральный директор
Сакович Артем Валерьевич	руководитель направления инжиниринга

ООО «Харьковмаш»

Тел.: (38 057) 759-13-37(08), факс: (38 057) 759-13-37

Кравцов Андрей Николаевич	технический директор
Миронова Инна Дмитриевна	начальник информационно-аналитического отдела
Валуев Алексей Анатольевич	начальник управления маркетинга и логистики закупок
Навроцкий Владислав Викторович	начальник управления проектами в нефтяной отрасли

ООО «Химагрегат-Медиа», журнал «Химагрегаты»

Тел.: (499) 730-03-03

Толстенко Ирина Евгеньевна	главный редактор
Кондрашкина Ксения	корреспондент

ООО «ЭКОЛАЙН-Гидротехника»

Тел.: (8482) 55-99-02

Елисеев Денис Сергеевич	технический директор

ООО «НПЦ “Динамика”»

Тел./факс: (3812) 25-42-44, 25-43-72

Науменко Александр Петрович	зам. начальника отдела технической поддержки и продвижения систем
Ткаченко Анна Анатольевна	инженер отдела продаж

ООО «Элатиф-Сервис»

Тел.: (495) 725-66-23

Коваль Андрей Александрович	генеральный директор

Костюков В.Н., Науменко А.П., Ткаченко А.А.
Концепция выбора и обоснование характеристик системы мониторинга состояния насосного оборудования 81

Вознюк А.М.
Повышение надежности насосного оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств при помощи систем и приборов ООО «Балтех»..... 102

Басов С.С.
Система диагностики КД2210 как инструмент увеличения межремонтного пробега для повышения надежности насосного оборудования..... 110

Елисеев Д.С.
Современное оборудование насосных станций водооборотных циклов промышленных предприятий 121

Варфоломеев А.В.
Взрывозащищенные электродвигатели производства ОАО «СЭЗ» 130

Кузенков Н.В.
«Flowserve»: обзор и возможности 138

Зайнуллин Р.М.
Современные центробежные насосы для сложных сред и условий эксплуатации..... 143

Ганенков А.В.
Применение дозировочных и технологических мембранных насосов LEWA в нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах 147

Walczak S.
Опыт применения дозировочных насосов и станций производства фирмы «Zakład Doskonalenia Zawodowego, Zakład Produkcyjny FAPO-Pompy Dozujace» на НПЗ России и стран СНГ 151

Лаховский А.Б.
ОАО «НИИ ЛМ» – перспективы развития..... 157

Щербаков А.В.
Применение современных технологий при производстве насосов для перекачивания нефтепродуктов и легковоспламеняющихся жидкостей..... 162

Григорьев А.В.
Супервайзинг насосно-компрессорного оборудования 168