

УДК 681.5:004

О.Ф. Цуверкалова, М.Н. Галанова, И.Н. Кунянькин, Д.А. Меркулов**Статистический анализ состояния технологических систем АЭС**

Рассматриваются возможные подходы к оценке состояния технологических систем на основе статистической обработки данных мониторинга параметров оборудования в режиме реального времени. Предложен алгоритм оценки состояния технологического процесса на основе трехкомпонентного вектора.

Ключевые слова: технологические параметры, контроль качества, мониторинг, диагностика, статистическая обработка.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-197-200

Одним из первостепенных условий обеспечения безопасности атомных станций является стабильность работы технологического оборудования. Это обеспечивается непрерывным мониторингом значений основных технологических параметров. На действующих станциях России в обязательном порядке используется в том или ином виде система представления технологических параметров (СПТП). Данный программный комплекс предназначен для обеспечения сотрудников АЭС информацией в режиме реального времени. Программа представляет собой визуализатор технологических систем в виде мнемосхем (фрагментов), таблиц и трендов текущих значений технологических параметров, поступающих от системы верхнеблочного уровня АСУТП. Каждый параметр имеет следующие градации: текущее значение, верхнюю и нижнюю предупредительные границы, верхнюю и нижнюю аварийные границы. При достижении границ параметр на схеме меняет свой цвет в последовательности: зеленый, желтый, красный. Система позволяет контролировать режимы работы технологического оборудования энергоблока и анализировать процессы на основе общей информации о текущей ситуации.

Вместе с тем анализ ситуаций, приводящих к нарушениям режимов нормальной эксплуатации, позволяет сделать вывод о том, что сигнализация, показывающая технологу, что достигнут верхний предел значения, для ряда параметров формируется одновременно с командами технологических защит и блокировок (ТЗиБ) на отключение технологического оборудования. Таким образом, технолог фактически не имеет времени на оценку ситуации и тем более на принятие решения о корректировке технологических режимов. Однако следует отметить, что отклонения в работе оборудования не возникают мгновенно, а формируются в течение некоторого времени, поэтому целесообразно дополнить процедуру мониторинга использованием статистических методов обработки текущих значений. Статистические методы позволяют на основе текущих данных заблаговременно спрогнозировать возможные отклонения от технологического процесса, что позволяет своевременно принять корректирующие меры.

Таким образом, представляется целесообразным разработать и внедрить автоматизированную систему статистического контроля технологических процессов, которая позволит:

- осуществлять оперативный статистический контроль;
- обеспечивать специалистов оперативной аналитической информацией о стабильности технологических процессов на АЭС;
- прогнозировать выход процессов из стабильного управляемого состояния.

Пример технологического нарушения эксплуатации

На Ростовской АЭС использование статистических методов для обработки результатов мониторинга было впервые предложено начальником отдела технической диагностики А.К. Адаменковым, использовавшим расчет скользящих дисперсий для анализа развития технологического нарушения эксплуатации (ТНЭ), имевшего место в 2010 г. и приведшего к разгрузке энергоблока.

Суть рассматриваемого ТНЭ заключалась в следующем. По факту увеличения давления в конденсаторе 1 турбопитательного насоса ТПН-2 действием защиты был сформирован сигнал на останов в 15:38. Фиксирование оператором отклонений в работе оборудования и его действия по корректировке технологического процесса начались в 14:00.

В результате обработки архивных данных (расчета скользящих дисперсий) за рассматриваемый период времени было зафиксировано, что первоначально изменения в работе оборудования наблюдались уже в 7:30 утра, а затем в 12:30. При этом технологические параметры за рассматриваемый период не выходили за установленные границы значений. При начале предупредительных работ в 12:30, а не в 14:00 процесс возникновения ТНЭ был бы как минимум контролируемым (предупреждение системного оператора, плавное снижение нагрузки и т.п.). Оценка ситуации показывает, что существует большая вероятность того, что при заранее предпринятых действиях ТНЭ удалось бы избежать [1].

Приведенный пример показывает целесообразность применения статистических методов при проведении диагностики текущего состояния оборудования.

Применение карт контроля качества для диагностики состояния оборудования

Одно из возможных направлений совершенствования статистических методов контроля связано с использованием существующих программных про-

дуктов, позволяющих проводить обработку данных в режиме реального времени. В качестве среды обработки данных был выбран пакет STATISTICA компании Statsoft, включающий в себя специальный промышленный модуль STATISTICA QualityControl (QC) – контроль качества. Использование инструментов модуля позволяет создавать карты контроля качества, определяющие и визуализирующие различные статистические характеристики изучаемого процесса [2].

Наиболее часто используемыми видами контрольных карт для непрерывных переменных являются:

- X-карта – для контроля средних значений;
- R-карта – для отслеживания изменений размаха вариации.

Во всех контрольных картах по горизонтальной оси откладываются номера соответствующих выборок; а по вертикальной оси – значения статистических характеристик. На карту наносятся горизонтальные прямые, соответствующие «стандартному» значению параметра, а также допустимым границам его изменения. Верхний и нижний контрольные пределы (ВКП и НКП соответственно) по умолчанию устанавливаются на уровне $\pm 3\sigma$ (σ – среднее квадратическое отклонение от центральной линии) либо могут задаваться пользователем. Выход выборочных значений контролируемой характеристики за контролируемые пределы может свидетельствовать о разладке производственного процесса.

Для отслеживания появления систематической тенденции в расположении точек на контрольной карте используются критерии серий. С их помощью можно определить, является ли выход за контрольные пределы случайным или же он обусловлен воздействием некоторых неслучайных факторов. Для задания критериев поиска серий область контрольной карты делится на три зоны. В зону А попадают точки, отличающиеся от «стандартного» значения на величину от 2σ до 3σ в обе стороны, в зону В – точки с отклонениями от σ до 2σ , а в зону С – точки, отклонение которых от нормативного значения расстояний не превосходит $\pm\sigma$. Попадание определенного количества точек в ту или иную зону позволяет делать предположения о качестве процесса.

Анализ работы турбопитательного насоса с использованием контрольных карт

Возможность применения карт контроля качества была проверена на примере анализа работы турбопитательного насоса (ТПН) М.Н. Галановой и Д.А. Меркуловым.

Применим предлагаемую методику для анализа частоты вращения ротора. Для этого построим X- и R-карты с аварийными пределами, задаваемыми регламентом АЭС, и с пределами $\pm 3\sigma$, которые вычисляются исходя из средних значений выборок. Объем выборок возьмем равным 5.

Как видно на X-карте с границами, установленными регламентом (рис. 1), процесс идет стабильно, не выходя за границы допустимых значений. И толь-

ко график размахов показывает сильную колеблемость процесса, что может говорить о возможных отклонениях в работе оборудования. Теперь обратимся к X-карте с границами в $\pm 3\sigma$ (рис. 2). Здесь уже прослеживаются частые изменения в значениях частоты вращения ротора. Тем не менее практически все значения находятся в допустимых границах, и хотя две точки выходят за пределы $\pm 3\sigma$, это можно объяснить случайными факторами. Однако следует обратить внимание на то, что хотя скользящая средняя (пунктирная линия на рис. 2) не выходит за допустимую область, в изменении значений показателя присутствует явный тренд на снижение. Это может говорить как о нарушении технологического процесса, так и об изменении режима работы или об останове оборудования. Исследование процесса с помощью критериев серий (рис. 3) также подтверждает наличие тренда.

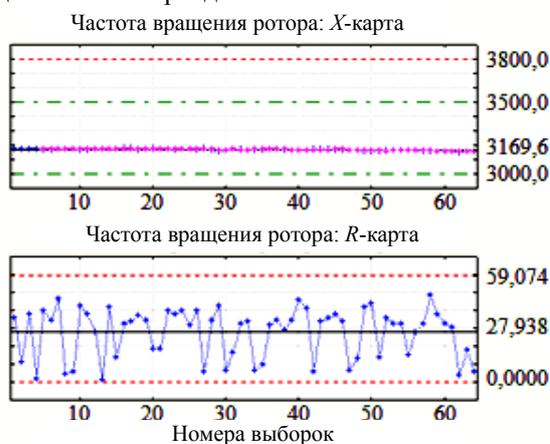


Рис. 1. X- и R-карты частоты вращения ротора с границами, установленными регламентом



Рис. 2. X-карта частоты вращения ротора с границами $\pm 3\sigma$

Частота вращения ротора		
Критерии	от выборки	до выборки
9 точек по одну сторону от центра	56	64
6 точек в возр./уменьш. ряду	ОК	ОК
14 точек в «шахматном порядке»	ОК	ОК
2 из 3 точек в зоне А или вне ее	57	59
	60	62
4 из 5 точек в зоне В или вне ее	55	59
	60	64
15 точек в зоне С	ОК	ОК
6 точек вне зоны С	56	63

Рис. 3. Критерии серий для частоты вращения ротора

Аналогичные исследования были проведены и для других параметров ТПН таких, как расход питательной воды, давление на напоре, виброскорость и температура подшипников, а также для различных объемов выборок. Дополнительно в качестве тестового примера был проведен анализ архивных данных упоминавшегося выше технологического нарушения, подтвердивший выводы, сделанные А.К. Адаменковым. Построение контрольных карт позволило выявить недостаток, присущий используемой системе контроля. Как уже отмечалось, СПТП реагирует только на выход значений за предупредительные или аварийные границы. При задании этих границ в качестве верхнего и нижнего контрольных пределов карты контроля качества для средних значений, как было показано выше, оказываются нечувствительными к изменению параметров. Поэтому представляется целесообразным при проведении мониторинга ориентироваться не на нормативные контрольные границы, а на более узкие, например $\pm 3\sigma$, что позволит диагностировать отклонения на ранних этапах их возникновения.

Оценка состояния технологического процесса на основе трехкомпонентного вектора

К недостаткам применения карт контроля качества следует отнести необходимость приобретения пакета STATISTICA и его интегрирования в существующую информационную систему предприятия, что приведет к значительным финансовым и временным затратам. В связи с этим представляется целесообразным разработать самостоятельную методику, базирующуюся на расчете набора статистических показателей, характеризующих состояние технологического процесса.

Анализ возможных аномальных ситуаций позволил выявить три типа отклонений от нормального течения процесса: возникновение тренда, появление «всплесков» – отклонений с большой амплитудой, изменение частоты/периода колебаний. В рамках работы над заданием турнира ТеМП, проводившегося ГК «Росатом» в марте–апреле 2016 г., И.Н. Кунянькиным было выдвинуто предложение оценивать состояние технологического процесса с помощью трехкомпонентного вектора, каждая из компонент которого характеризует одну из перечисленных особенностей процесса. Компоненты вектора являются безразмерными, что позволяет обеспечить универсальность методики.

Для практического применения методики необходимо наличие архивных данных, описывающих нормальную работу оборудования (например, новое оборудование или оборудование после планово-предупредительного ремонта (ППР)) в различных режимах. Это необходимо для определения нормативных значений показателей, характерных для нормальной работы оборудования.

Ниже приводится предлагаемый алгоритм построения вектора.

1. Для n последовательных значений наблюдаемого параметра определяются среднее арифметиче-

ское (скользящая средняя) $x_{\text{ср}}$, наибольшее x_{max} и наименьшее x_{min} значения.

2. Для выявления «всплесков» находится размах вариации: $R = x_{\text{max}} - x_{\text{min}}$.

3. Рассчитывается коэффициент осцилляции: $K_{\text{ос}} = R / x_{\text{ср}}$.

4. Первая компонента вектора определяется как отношение $K_{\text{ос}} / K_{\text{ос норм}}$.

5. По скользящим средним рассчитываются абсолютные приросты и определяется доля положительных приростов d^+ (при отсутствии тренда эта величина близка к 0,5).

6. Вторая компонента вектора определяется как отношение $d^+ / 0,5$.

7. Период колебаний P определяется как порядок наибольшего по величине коэффициента автокорреляции уровней временного ряда, полученного исключением тренда.

8. Третья компонента вектора определяется как отношение $P / P_{\text{норм}}$.

9. Полученный вектор сравнивается с идеальным вектором (1; 1; 1), характеризующим нормальное течение процесса. Чем больше отличие компоненты вектора от 1, тем сильнее выражена соответствующая аномалия. Результаты сравнения могут быть легко визуализированы с помощью лепестковой диаграммы.

Следует отметить, что объем выборки n должен подбираться индивидуально (в зависимости от оборудования, измеряемого параметра, частоты съема данных и т.п.) и при необходимости может быть изменен или проведены расчеты для нескольких значений n с целью уточнения результатов.

К положительным сторонам предлагаемой методики следует отнести:

- простоту реализации (предлагаемая методика может быть легко реализована на базе MS Excel либо любого другого программного продукта, имеющего возможность статистической обработки данных);

- оперативное информирование оператора о потенциальных аномалиях, своевременное выявление отклонений;

- накопление информационной базы по возможным нарушениям в работе оборудования.

К слабым сторонам можно отнести:

- необходимость внесения доработок в существующую систему оповещения оператора;

- использование дополнительной информации, требующей понимания/обучения.

Кроме того, тестирование предложенной методики на реальных данных выявило значительные сложности, связанные с определением периода колебаний. В настоящее время рассматриваются альтернативные подходы к определению третьей компоненты вектора.

Выводы

Внедрение статистических методов контроля за работой оборудования в практику эксплуатации АЭС позволит обеспечить:

- своевременное выявление аномалий в работе оборудования и оперативное реагирование на них, предотвращение нештатных ситуаций;

– уменьшение вероятности неплановых остановов оборудования, увеличение времени наработки на отказ, создание базы для дальнейшего развития системы диагностики;

– предотвращение финансовых потерь вследствие недовыработки электроэнергии, сокращение времени и затрат на ремонты оборудования.

Вместе с тем следует отметить, что любая автоматизированная система статистического контроля технологических процессов лишь выполняет функцию информирования оператора и не вносит никаких корректирующих воздействий. Принятие решения о том, является ли отклонение от нормального состояния процесса свидетельством возникновения аномалии, должно приниматься специалистами, опираясь на предыдущий опыт эксплуатации оборудования и анализ возникавших нештатных ситуаций.

В качестве перспектив дальнейших исследований можно выделить следующие направления:

1. Создание базы данных, характеризующих нормальную работу оборудования при различных режимах эксплуатации

2. Разработка методики определения объема выборки с учетом индивидуальных особенностей оборудования.

3. Основным недостатком предложенных подходов является контроль отдельных параметров системы без учета зависимостей между ними. Однако качество процесса, как правило, определяется несколькими взаимосвязанными показателями. В этом случае наличие даже незначительных систематических отклонений одного из параметров системы может привести в дальнейшем к существенному изменению коррелированных с ним параметров, что повышает вероятность сбоя в системе. Таким образом, еще одной из возможных задач является учет взаимосвязей между контролируруемыми параметрами.

Литература

1. Сальников А.А. «Режимная диагностика» на основе преобразования данных системы представления технологических параметров / А.А. Сальников, А.Г. Жуков, А.К. Адаменков // Восьмая Междунар. науч.-техн. конф.

«Безопасность, экономика и эффективность атомной энергетики», 23–25 мая 2012 г.: тезисы докладов. – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2012. – С. 128–130.

2. Описание инструментов программного модуля STATISTICA QualityControl (QC). – Контроль качества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://statistica.ru/local-portals/quality-control/>

Цуверкалова Ольга Феликсовна

Доцент каф. информационных и управляющих систем Волгодонского инженерно-технического института (ВИТИ), филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Тел.: +7-903-40-49-852

Эл. почта: OFTsuverkalova@mephi.ru

Галанова Мария Николаевна

Студентка 4-го курса ВИТИ

Тел.: +7-918-590-75-08

Эл. почта: mashoolka@yandex.ru

Кунянькин Иван Николаевич

Студент 1-го курса магистратуры ВИТИ

Эл. почта: IKunjankin@gmail.com

Меркулов Дмитрий Александрович

Студент 4-го курса ВИТИ

Тел.: +7-938-111-44-07

Эл. почта: merkulov.dima@yandex.ru

Tsuverkalova O.F., Galanova M.N.,

Kunyankin I.N., Merkulov D.A.

Statistical analysis of NPPs technological systems condition assessment

This paper concerns possible approaches to the assessment of technological systems based on statistical analysis of the data obtained through the real time equipment parameters monitoring. The state estimation algorithm based on three-dimensional vector is proposed.

Keywords: technological parameters, quality control, monitoring, diagnostics, statistical processing.