

**Скворцов О.Б.**

## **Системы вибрационной противоаварийной защиты больших энергетических агрегатов**

**Аннотация:** Представлен анализ решений по организации быстродействующей автоматической противоаварийной защиты мощных роторных агрегатов объектов энергетики. Предложены методы повышения достоверности срабатывания с использованием функционального резервирования результатов контроля пространственной вибрации.

**Ключевые слова:** вибрация, усталость, авария, неисправность, защита, достоверность, резервирование

Средства автоматического дистанционного вибрационного мониторинга оборудования являются обязательными для энергетических агрегатов с мощностью более 50 Мвт. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 13381–1–2016 прогнозирование остающегося ресурса эксплуатации характеризуется вероятностными оценками и для сложного оборудования имеется вероятность развития отказа. Снизить влияние таких возможных аварийных ситуаций, прежде всего, для снижения рисков вторичных повреждений, возможно за счет использования эффективной системы противоаварийной защиты. Для мощного роторного оборудования контроль уровня интенсивности вибрации, начиная с первых международных стандартов в данной области - ISO 2372, служит для оценки вибрационного состояния агрегата по критериям «хороший» - «удовлетворительный» - «плохой» [1]. Это по существу упрощенная процедура диагностирования. Построенная на основе таких оценок защита на случай повышенной вибрации ориентирована в значительной степени на субъективное восприятие вибрации и не учитывает особенностей проявления вибрационной усталости [2, 3]. Синхронный многоканальный мониторинг пространственной вибрации позволяет не только повысить точность диагностирования и прогнозирования, но также за счет формирования виртуальных измерений в эквивалентных направлениях реализовать режим функционального резервирования без физического введения дублирующих датчиков и каналов измерения [4, 5].

Кроме функционального резервирования реализующего мажоритарную логику принятия решения о защите, повысить достоверность срабатывания можно за счет учета других физических явлений сопровождающих развитие дефекта [7].

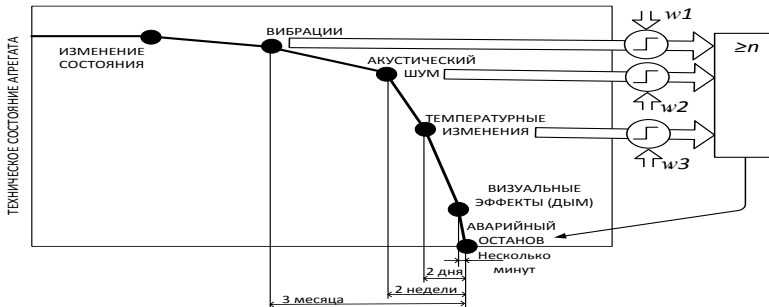


Рис. 1 – Характерные проявления реакции физических процессов в оборудовании под влиянием дефекта

Такие проявления менее чувствительны к наличию дефекта на ранних стадиях его развития, и становятся заметными незадолго до возникновения аварийной ситуации, как показано на рис. 1.

Для обеспечения достоверности формирования сигнала аварийного останова можно использовать различные методы, основанные на многоканальном контроле критических параметров. Использование мажоритарного голосования может быть применено к последовательным во времени оценкам, параллельным во времени оценкам однотипным параметра одного из контролируемых процессов, например вибрации в различных точках объекта, параллельным контролем различных параметров таких процессов, а также контролем параметров разных физических процессов, например вибрации и температуры. Такое голосование должно быть основано на использовании соответствующих пороговых (весовых) коэффициентов, адаптивно выбираемых для данного типа оборудования.

Функционирование системы противоаварийной защиты благодаря требованиям минимальной задержки срабатывания и высокой достоверности такого срабатывания имеет существенные особенности вибрационных измерений, выполняемых при решении

задач диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса. Вибрационная диагностика и прогнозирования требуют в первую очередь выполнения измерений с высокой точностью и, в большинстве случаев, в широком частотном диапазоне. Такой частотный диапазон может быть шире стандартного - от 5(10) Гц до 1 КГц. Причем как в области низких, так и высоких частот. Ограниченный бюджет реализации систем мониторинга обычно предполагает использование общих аппаратных средств, как для системы защиты, так и диагностики и прогнозирования.

Для обеспечения удовлетворительной скорости отклика на развитие аварийной ситуации ответственного роторного оборудования желательно реализовать многоступенчатую структуру защиты. Скорость отклика системы в первую очередь связана с физическими ограничениями на минимальное время измерения параметра, по которому срабатывает СПАЗ. Для роторных механизмов в качестве минимального измерительного времени можно рассматривать один период оборотной частоты ротора. Для оборотной частоты минимальное измерительное время может быть равно половине времени оборота, т.е. для одного оборота можно получить две оценки амплитуды интенсивности вибрации и при превышении порогового уровня при совпадении таких оценок возможно формирование сигнала аварии на оборотной частоте. Одним из наиболее распространенных примеров такой вибрации является проявление дисбаланса ротора, связанного, например, с отрывом массы. Алгоритмы выявления дисбаланса описаны в ряде источников, например в [8]. Кроме дисбаланса на оборотной частоте могут проявляться и другие дефекты: несоосность, задевания, дефекты обработки и др. За время равное одному оборотному периоду появление повышенного уровня (сигнал СПАЗ 1 на рис. 2) вибрации может быть выполнено и для более высокочастотных составляющих. Для оборудования с промышленной частотой 50 Гц минимальное время отклика в этом случае составит 20 миллисекунд.



Рис. 2 – Структура сбора данных для системы противоаварийной защиты

Обнаружение недопустимой интенсивности вибрации во всей полосе контролируемых частот требует существенного большего времени, ограниченного нижней граничной частотой – порядка долей секунды. Обычно для получения устойчивой оценки требуется порядка 0,4 секунды. Такое время формирования оценки возникновения аварийной ситуации указано в качестве величины, позволяющей получить подтверждение достижения аварийного уровня в нормативной документации. Задержка срабатывания в виде сигнала СПАЗ 2 приблизительно в 20 раз больше, чем для СПАЗ 1.

Еще более медленной является защита, ориентированная на результаты выполнения диагностического анализа или прогнозирования (СПАЗ 3). Задержка получения данных диагностики или прогнозирования остаточного ресурса может быть большой и не всегда сама по себе требует мгновенной автоматической реакции. Однако обнаружение опасного дефекта

или критического снижения остаточного ресурса требует корректировки пороговых уровней, поскольку в этих случаях даже ране допустимые изменения вибрации, связанные, например, с режимными факторами, могут стать опасными. Особенно существенным является необходимость учета износа оборудования. Поскольку пороги прочности существенно снижаются как следствие многоциклового и сверхмногоциклового усталости, в том числе как следствие воздействия высокочастотной вибрации. Рост износа следует учитывать в изменениях порогов срабатывания СПАЗ.

Сокращение времени отклика на изменение вибрации с использованием сбора данных в режиме перекрытия хотя и сокращает минимальное время между получаемыми оценками, но сопровождается замедленным ростом измеренного уровня, поскольку в оценку при этом входит значительная часть данных, собранных до момента образования причины возникновения аварийной ситуации.

Система автоматической противоаварийной защиты должна обеспечивать высокую скорость реакции на развитие дефекта на интервале времени непосредственно предшествующего аварии. Срабатывание такой системы, даже если она и не может полностью предотвратить аварию, может существенно сократить размеры вторичных повреждений. Автоматическое выполнение аварийного останова оборудования часто ограничено требованиями технологического процесса. Например, на объектах нефтехимического производства процесс допустимого останова может быть достаточно длительным. В любом случае, достоверность срабатывания системы противоаварийной защиты имеет первостепенное значение, поскольку как пропуск аварийной ситуации, так и ложное срабатывание могут приводить к значительным финансовым, репутационным потерям, простоям или сопровождаться значительными вторичными повреждениями из-за некорректного функционирования системы противоаварийной защиты.

Литература:

1. Рунов Б.Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с.

2. *Скворцов О.Б., Радчик И.И., Сушко А.Е.* Применение многокомпонентных датчиков вибрации в системах мониторинга и противоаварийной защиты роторных агрегатов // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 11. – С.6–19.
3. *Скворцов О. Б.* Вибрационная прочность: мониторинг, диагностика, защита // Научные чтения им. И. А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». М.: 6-7 сент. 2018.. ИМЕТ РАН 2018. С.138–139.
4. Патент RU 2658568, кл. G01P 15/09, БИ № 18. 2018.
5. Патент RU 2658577, кл. G01H 11/06, БИ № 18. 2018.
6. *Скворцов О. Б.* Перспективы развития нормативной базы и расширения вибрационного мониторинга роторного оборудования // Электрические станции. – 2017. – № 8. – С. 46–53.
7. *Henríquez P., Alonso J. B., Ferrer M. A., Travieso C. M.* Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems. – 2014. – 12 p.
8. *Скворцов О. Б.* Анализ вибрационных сигналов при решении задач балансировки роторов // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – № 2. – С.60–66.