

В.Г. ПЕТРОСЯН

КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ АЭС С ВВЭР- 440

Изложены основы построения интегральной системы мониторинга и диагностики (ИСМО) оборудования АЭС с ВВЭР-440. Приведена алгоритмическая структура системы, состоящей из трех основных модулей. С точки зрения комплексной диагностики, показана целесообразность интеграции отдельных модулей, учитывая при этом опыт их эксплуатации на энергоблоке №2 Армянской АЭС.

Ключевые слова: протечка, диагностирование, вибрация оборудования, локализация, мониторинг, идентификация.

1. Обоснование создания ИСМД. В настоящее время явно намечается направление по созданию интегральных систем диагностики оборудования АЭС, которое считается перспективным. В частности, во всемирно известной фирме «Вестингауз» создана интегральная система диагностики «ALLY», которая внедрена во многих странах. Во ВНИИАЭС разработана система виброшумовой диагностики с широким назначением, а именно, выявление аномальных вибрационных состояний оборудования реакторной установки (РУ), вызванных изменением условий закрепления оборудования, изменением его жесткостных характеристик или возрастанием гидродинамических нагрузок со стороны потока теплоносителя. При этом объектом диагностирования является главный циркуляционный контур РУ типа водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР), включая реактор с внутрикорпусными устройствами, главные циркуляционные насосы, парогенераторы, опоры и элементы крепления компонентов первого контура.

Мониторинг за вибрационными характеристиками сложных конструкций способен выявить на ранней стадии появление механических дефектов или аномальное изменение условий закрепления элементов конструкций, т.е. появляется возможность диагностирования с выходом на причину той или иной аномалии.

Опыт эксплуатации систем контроля протечки теплоносителя (СКТТ), обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов (СОССП) и контроля за вибрациями (СКВ) компонентов первого контура, установленных на энергоблоке №2 ААЭС, показал целесообразность и эффективность интеграции указанных систем с целью комплексного диагностирования и идентификации причин аномалий и возможных дефектов.

Например, в случае, когда СОССП регистрирует ударные явления, то параллельно с ней и СКТТ реагирует на это явление, несмотря на то, что частотные диапазоны сигналов разные. По информации обеих систем можно более точно установить причину и элемент, порождающий аномалию, используя при этом возможности локализации источника энергии и протечки. Для подтверждения этого факта были проведены специальные эксперименты, которые заключались в

следующем. Во время ППР-2002г. были нанесены тестовые удары по элементам первого контура. При этом, во-первых, ударные явления были зарегистрированы как СОССП, так и СКТТ; во-вторых, что не менее важно, по информации как СОССП, так и СКТТ были реализованы программы локализации, результаты которых были весьма близки.

Следует отметить, что аналогичная картина наблюдалась и при анализе и обработке информации СОССП и СКТТ на работающем блоке, что позволяет сделать заключение о том, что эффективность процесса диагностирования существенно повышается на основе информации, полученной параллельно из обеих систем.

Другим не менее важным фактором для комплексного диагностирования аномалий является совместное исследование и обработка информации СОССП и СВК, что позволяет установить тип и место ударного явления, (сосредоточенный удар или наоборот), стационарность (или нестационарность) источника энергии, изменение спектральных характеристик сигналов (изменение резонансов и амплитуд сигналов), а также выделить общеконтурные вибрации, идентифицировать резонансы, прогнозировать развитие аномалий и т.д.

Исходя из вышеизложенного и основываясь на опыте эксплуатации диагностических систем, установленных на энергоблоке №2 ААЭС, в Институте «Арматом» ведутся разработки по созданию ИСМД для АЭС с ВВЭР-440.

2. Структура математического обеспечения (МО) ИСМД. ИСМД включает в себя системы:

- контроля за протечками теплоносителя (СКТТ);
- контроля за вибрациями оборудования первого контура ВВЭР-440 (СВК);
- контроля за ударными явлениями (СКУЯ).

2.1. Структура МО СКТТ. МО СКТТ состоит из следующих блоков.

Блок 1. В этом блоке организована проверка факта фиксации протечки по превышению показаний датчиков в **dB** пороговые значения.

Блок 2. Этот блок предназначен для локализации протечки по сигналам датчиков. При этом предусмотрена коррекция значений сигналов датчиков.

Блок 3. В этом блоке по результатам функционирования блока 2 определяется расход протечки при заданном коэффициенте перевода сигналов в **dB** на расход протечки в $\text{м}^3/\text{с}$.

Результаты реализации блоков 2 и 3 выводятся на экран дисплея в виде графиков локализации расхода протечки. Алгоритмы локализации и расхода протечки, а также результаты численных экспериментов, проведенных на энергоблоке №2 ААЭС, изложены в [1-3].

2.2. Структура МО СВК. СВК предназначены для контроля за вибрациями оборудования первого контура (ГЦН, ПГ, ГЗЗ, ГЦТ, Ду200). МО СВК состоит из следующих блоков:

Блок 1. В этом блоке реализуется Фурье-преобразование (прямое), в результате чего выдаются спектральные характеристики зарегистрированных сигналов, т.е. осуществляется перевод временных реализаций сигналов в частотную область.

Блок 2. Этот блок по результатам реализации блока 1 формирует множество резонансных частот в диапазоне $0 \dots 100 \text{ Гц}$.

Блок 3. В этом блоке проводится оценка вибросостояния оборудования первого контура АЭС (ГЦН, ПГ, ГЗЗ, ГЦТ) с выдачей результатов в виде текстовой и графической информации в динамике (временные зависимости параметров оценки – виброускорение, виброскорость, виброперемещение) [4].

2.3. Структура МО СОССП. СОССП предназначена для обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов в первом контуре энергоблока АЭС, МО которой состоит из следующих основных блоков:

Блок 1. Этот блок регистрирует сигналы датчиков СОССП, строит энергетические спектры (Фурье-преобразование), устанавливает резонансы при происшествиях.

Блок 2. Этот блок реализовывает алгоритмы локализации источника энергии и определения массы ударяющего предмета [5, 6].

Блок 3. Этот блок организывает выходную информацию, содержащую результаты локализации, определения массы и идентификации происшествий в текстовом и графическом виде.

МО каждой из рассмотренных выше систем реализуется на одном автономно работающем РС компьютере, который включен в локальную вычислительную сеть и управляется главным РС компьютером, реализующим алгоритмы анализа состояния и комплексного диагностирования оборудования первого контура энергоблока АЭС с выходом на причину аномалий.

3. Комплексное диагностирование. При комплексном диагностировании реализуются следующие сценарии.

Первый сценарий. Допустим, что система СКТТ зарегистрировала аномальное явление, о чем выдала сообщение главному компьютеру. По этому сообщению главный компьютер запрашивает выходные информации из всех трех автономно работающих систем СКТТ, СКВ и СОССП. В главном компьютере анализируется поступившая текстовая и графическая информация по каждой системе, в результате чего устанавливаются количественные значения изменения контролируемых (основных) параметров по системам. При этом, если изменение параметров существенно (по заранее установленным критериям) только в системе СКТТ, то по местоположению протечки выносится решение о возможном дефекте и прогнозе развития в конкретном элементе первого контура, о чем выдается соответствующее сообщение, в том числе о продлении времени слежения за процессом.

В рассматриваемом сценарии случаи значительных изменений параметров, полученных из двух других систем, как правило, следует исключить.

В этом сценарии важным фактором является рассмотрение процесса изменения величины расхода протечки во времени, т.е. в динамике, благодаря которому может быть оценено развитие трещинной протечки и реализации концепции «Течь перед разрывом».

Второй сценарий. Допустим, что имело место ударное явление, о чем в главный компьютер передается сообщение из СОССП. В этом случае основной задачей является идентификация типа удара (чистый или наоборот). Установление

типа удара осуществляется по характеристике энергетического спектра сигналов СОССП. При чистом ударе, как правило, в спектре наблюдается один ярко выраженный пик, в противном случае - число пиков бывает больше одного, что является важным для выхода на причину аномалии наряду с локализацией источника энергии, установлением факта стационарности местоположения источника или подвижности и периодичности явления.

По результатам анализа локализации местоположения источника энергии, стационарности или подвижности местоположения, периодичности ударного явления, изменения структуры энергетического спектра можно установить необходимые данные и сформировать диагностические признаки, конкретный дефектный элемент с выходом на причины аномалий.

В рассматриваемом сценарии для комплексного диагностирования будет использована информация, полученная из СКТТ и СВК. Как было отмечено выше, на ударные явления, помимо СОССП, реагирует также СКТТ, следовательно, выходная информация СКТТ будет способствовать более точной идентификации события. Конкретно, информация СКТТ по локализации при рассмотренном сценарии будет весьма полезной для анализа процесса локализации источника энергии и решения задачи стационарности и периодичности ударного явления.

В ИСМД обеспечивается совместное использование информации СОССП и СВК при комплексном диагностировании, в частности, исследование когерентности, проведение взаимно-корреляционного и спектрального анализа сигналов СОСП и СВК, что позволит более наглядно установить диагноз и причины ударного явления.

В этом сценарии важным является оценка массы, так как причиной ударного явления является свободный предмет. Кроме того, совместное рассмотрение сигналов обеих систем дает возможность оценить вибрационное состояние дефектного элемента в динамике при ударном явлении.

Третий сценарий. В этом сценарии система СВК зарегистрировала аномальное явление, т.е. имело место превышение пороговых значений параметров (виброскорость и виброперемещение) оценки вибросостояния элементов первого контура по результатам обработки сигналов вибропреобразователей. Система СВК выдает необходимую для оценки информацию в текстовом и графическом виде для каждого канала и, следовательно, объекта, на котором установили вибропреобразователь. Следовательно, информация о локализации объекта, на котором произошли изменения, уже имеется.

Мониторинг за вибрационными характеристиками объекта диагностирования (ГЦН, ГЦТ, ПГ, ГЗЗ) позволяет выявить на ранней стадии появление механических дефектов, используя вибрационные характеристики (например, резонансы). Так как вибрационные характеристики (например, резонансные частоты) связаны с определенными параметрами конструкции, то появляется возможность диагностирования с выходом на причину.

Среди спектральных особенностей сигналов датчиков СВК и СОССП можно выделить следующие классы резонансов:

- собственные частоты вибраций элементов первого контура;

- резонансные частоты возбуждающих сил (например, частоты вращения ГЦН с нелинейными явлениями).

Каждая из этих характеристик служит диагностическим признаком в системе, при этом объектом наблюдений являются резонансы спектральных характеристик.

Процесс диагностирования происходит по изложенным ниже сценариям:

- вид диагностируемого оборудования первого контура;
- совокупность измерительных каналов, необходимых для диагностирования именно данного элемента первого контура;
- параметры измерения (количество отсчетов, частоты дискретизации и т.д.);
- алгоритмы обработки;
- вид и объем информации, полученной в результате диагностирования.

При этом выделяется не одно множество резонансов, а несколько, каждое из которых принадлежит определенному аномальному явлению.

Сценарии включают в себя следующие элементарные операции:

- чтение входных процессов, установление частоты дискретизации ($f_{ц}$), диапазон частот ($f_{ц}$); число точек в одном канале;
- предварительная обработка: центрирование, исключение линейного тренда, проведение (0,1) – процесса;
- фильтрация (низкая, высокочастотная, полосовая);
- оценка корреляционной функции (авто-, взаимокорреляционная функции), автоспектральной и взаимоспектральной плотности (модуль и фаза), когерентности;
- операции с множеством частот: выделение частот локальных максимумов; объединение и пересечение множеств частот экстремумов;
- подготовка текстовой и табличной информации, отображающей итоги реализации конкретного сценария.

Блок-схема функционирования ИСМД представлена ниже.

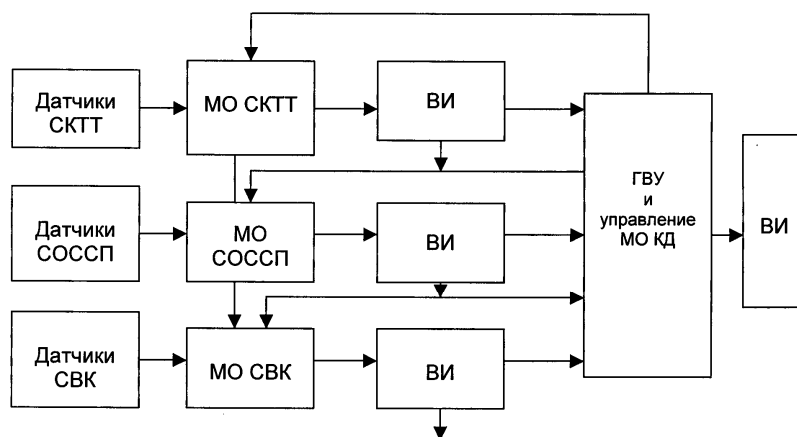


Рис. Функциональная схема ИСМД: СКТТ – система контроля течи теплоносителя; СОССП – система обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов; СВК – система вибрационного контроля; МО – математическое обеспечение; ВИ – выходная информация (текстовая и графическая); КД – комплексное диагностирование; ГВУ – главное вычислительное устройство

При разработке МО ИСМД важное значение приобретает оптимальное разбиение и синтез комплекса задач по уровням иерархии системы. Эта проблема успешно может быть решена в процессе создания и испытаний ИСМД, главным образом испытаний эффективности отдельных алгоритмических блоков и системы в целом.

В настоящее время первая часть проблемы решена нами и экспериментально испытана на ААЭС, однако разработки по решению проблемы в целом продолжаются. При этом главные усилия направлены на выбор оптимального состава задач по уровням иерархии, оптимизацию информационных потоков и структуры системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросян В.Г., Шахвердян С.В.** Система контроля течи теплоносителя из первого контура ВВЭР – 440. Алгоритм локализации течи: Сб. докл. 1-й Межд. энерг. конф. в Армении. – Ереван, 1998. – С.63-74.
2. **Маркосян Г.Р., Петросян В.Г., Шахвердян С.В., Асланян М.А.** Совершенствование диагностической системы «Альс» для определения места течи теплоносителя из первого контура ВВЭР – 440 // Теплоэнергетика. – 2000. – №5 – С.15-20.
3. **Петросян В.Г., Маркосян Г.Р., Шахвердян С.В.** Иерархический алгоритм локализации протечки из первого контура ВВЭР-440 // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2001. –Т. 54, № 1. – С. 47-51.
4. **Петросян В.Г., Маркосян Г.Р., Шахвердян С.В.** Методы локализации источника энергии в СОССП // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2001. – Т.54, №2. – С.218-222.
5. **Петросян В.Г., Шахвердян С.В., Асатрян В.Г.** Опыт эксплуатации системы контроля течи теплоносителя (СКТТ) на энергоблоке №2 Армянской АЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – №12 – С.22-25.
6. **Петросян В.Г., Гюлбудагян Р.Р.** Совершенствование систем диагностики состояния оборудования на Армянской АЭС // Теплоэнергетика. – 2002. – №5– С.31-35.

Ин-т «Арматом». Материал поступил в редакцию 12.07.2003.

Վ. Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՋՋԷՌ-440 ՏԻՊԻ ԱԷԿ-ԵՐԻ ՎԵՐԱՀԱՄԱՐՄԱՆ ԵՎ ԱԽՏՈՐՈՇՄԱՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԼԳՈՐԻԹՄԵՐԻ ՀԱՄԱԽՈՒՄԲ

Ներկայացված են ՋՋԷՌ-440 տիպի ԱԷԿ-երի սարքավորումների վերահսկման եւ ախտորոշման ինտեգրալ համակարգի կառուցման հիմունքները, նկարագրված է երեք մոդուլներից բաղկացած համակարգի ալգորիթմական կառուցվածքը: Հայկական ԱԷԿ-ի 2-րդ էներգաբլոկում շահագործման փորձի հիման վրա ցույց է տրված համակարգի նպատակահարմարությունը համալիր վերահսկման և առանձին մոդուլների ինտեգրման տեսանկյունից:

V.G. PETROSYAN

ALGORITHM COMPLEX OF INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS AT NPP WITH THE WWER-440 REACTOR

The design principles of the integrated system for equipment monitoring and diagnostics at NPP with the reactor of WWER-440 type are presented. The system algorithmic structure with three key modules is described. Using the experience of the system operation at unit 2 of Armenian NPP the advisability of such a system is deduced from complex diagnostics and integration of separate modules view point.