

торных установок дефектоскоп должен обеспечивать возможность дистанционного контроля, при котором рабочее место оператора дефектоскопа может быть удалено от зоны контроля на безопасное расстояние.

5. Возможность работы в составе автоматизированных систем

В настоящее время большинство задач ВТК на АЭС решаются с помощью автоматизированных вихретоковых систем, в состав которых помимо дефектоскопа и вихретокового преобразователя (ВТП) входит сканирующее устройство, например, манипулятор, который обеспечивает перемещение ВТП во время контроля [1, 2]. Такие системы позволяют исключить ручной контроль, связанный с большими дозовыми нагрузками на дефектоскопистов, а также значительно сократить время выполнения контроля.

Чтобы обеспечить возможность работы дефектоскопа в составе автоматизированных систем, в нем должны быть реализованы технические решения, позволяющие осуществлять сопряжение со сканирующими устройствами разных типов.

6. Надежность и удобство эксплуатации

В условиях АЭС, когда в сжатые сроки необходимо выполнить большой объем контроля, эти требования к дефектоскопу приобретают важное значение.

Требования к дефектоскопу

Рассмотрим конкретные требования к вихретоковому дефектоскопу, выполнение которых обеспечивает достижение указанных выше целей.

1. Дефектоскоп должен представлять собой аппаратно-программный комплекс, в состав которого входит компьютер. Без использования компьютерной техники невозможно реализовать современные эффективные технологии ВТК, предполагающие, в частности, большой объем высокоскоростной программной обработки вихретоковых данных.

Возможны два варианта построения компьютерного вихретокового дефектоскопа:

- в виде моноблока на основе мобильного промышленного компьютера;
- в виде отдельного электронного блока, работающего совместно с компьютером.

2. Дефектоскоп должен работать с ВТП различных типов.

Во-первых, это необходимо, чтобы обеспечить универсальность прибора. При контроле на АЭС в зависимости от типа контролируемого элемента используются самые разнообразные ВТП: проходные и накладные, трансформаторные

и параметрические, абсолютные и дифференциальные, статические и вращающиеся.

Во-вторых, даже при контроле одного и того же элемента могут использоваться ВТП различных типов, так как это позволяет повысить достоверность и информативность результатов контроля. Например, при контроле ТОТ для уточнения типа, размеров и ориентации несплошностей, обнаруженных проходным ВТП, а также для определения их количества в одном сечении трубы часто используются накладные (вращающиеся или многоэлементные) ВТП.

3. Дефектоскоп должен иметь как минимум два входных канала (для одновременной работы с двумя ВТП).

Это связано с тем, что при контроле ТОТ часто одновременно используются дифференциальный и абсолютный проходные ВТП (на практике это реализуется с помощью одного ВТП с различным включением обмоток). Дифференциальный ВТП является основным и предназначен для обнаружения и определения параметров локальных (непротяженных) несплошностей. Абсолютный ВТП позволяет получать информацию о протяженных несплошностях.

4. Параметры режима работы дефектоскопа (ток возбуждения, коэффициент усиления, частота и другие) должны быть программно-управляемыми. Это необходимо для обеспечения оптимального режима каждого из используемых ВТП и для реализации различных методик ВТК, применяемых при контроле на АЭС.

5. Частотный диапазон дефектоскопа должен быть как минимум от 1 до 1000 кГц. Такой диапазон вполне достаточен для проведения ВТК элементов оборудования АЭС. В качестве справки ниже приводятся частотные диапазоны, используемые при контроле некоторых объектов:

- ТОТ ПГ: $10 \div 700$ кГц;
- перемычки коллекторов ПГ: $8 \div 70$ кГц;
- резьба крепежных элементов: $20 \div 160$ кГц.

6. Дефектоскоп должен быть многочастотным и обеспечивать одновременное получение сигналов не менее чем на трех частотах.

Многочастотный метод необходим, прежде всего, при контроле неферромагнитных ТОТ (ПГ, конденсаторов турбин и др. теплообменных аппаратов). При этом используется основная частота и набор вспомогательных частот. При работе на основной частоте должны уверенно обнаруживаться несплошности требуемых размеров как на внутренней, так и на наружной поверхности ТОТ. Минимальный набор вспомогательных

частот включает в себя низкую и высокую (по отношению к основной) частоты. Низкая частота предназначена для отстройки от внешних (по отношению к ТОТ) элементов конструкции, таких как решетки, коллектор или трубная доска, а также от электропроводящих и /или магнитных отложений на наружной поверхности ТОТ. Высокая частота предназначена для подавления влияния геометрических неоднородностей внутренней поверхности ТОТ (аномалии в области развальцовки, шероховатость поверхности и др.), а также колебаний ВТП во время его движения. Увеличение отношения сигнал/шум удается получить за счет комбинирования сигналов, полученных на двух или более частотах (основная плюс вспомогательная, две вспомогательные и др.).

Кроме ТОТ многочастотный метод используется, в частности, при контроле перемычек коллекторов ПГ и резьбы крепежных элементов.

Для реализации многочастотного метода, как известно, в дефектоскопе может использоваться либо параллельное, либо последовательное возбуждение частот. Предпочтение следует отдать первому варианту как обеспечивающему более высокое быстродействие дефектоскопа.

6. Разрядность АЦП дефектоскопа должна быть не менее 14 бит.

Качество получаемых вихретоковых данных напрямую зависит от разрядности АЦП дефектоскопа. Однако чем выше разрядность АЦП, тем сложнее обеспечить высокие скорости преобразования и программной обработки вихретоковых данных.

В стандарте ASME [5] указано, что разрядность АЦП дефектоскопа, используемого для вихретокового контроля неферромагнитных ТОТ, должна быть не менее 12 бит. Это требование было установлено более 20 лет назад и его следует считать устаревшим. В настоящее время при разрядности АЦП 14 бит (16384 уровней квантования) в дефектоскопе можно получить сочетание высокого качества вихретоковых данных с высоким быстродействием.

7. Частота дискретизации АЦП дефектоскопа должна быть не менее 64 кГц.

Рассмотрим, с чем связано это требование. Частота дискретизации АЦП дефектоскопа должна обеспечить требуемый интервал между многопараметровыми отсчетами вдоль линии сканирования (интервал дискретизации) при данной скорости сканирования.

В стандарте ASME [5] записано, что этот интервал должен быть не менее 0,8 мм (30 отсчетов на дюйм), однако, по

мнению многих специалистов по ВТК, это значение слишком велико. Дело в том, что во многих случаях при ВТК требуется измерить пиковые значения сигналов, которые представляют собой импульсы шириной (по уровню 0,5; в единицах длины вдоль линии сканирования) не более 3 мм. Если использовать интервал дискретизации 0,8 мм, то при измерении пиковых значений таких сигналов могут возникнуть существенные погрешности. Хорошие результаты можно получить, если интервал дискретизации будет не менее 0,5 мм.

Требуемую частоту дискретизации F можно определить по формуле: $F = NV/d$, где N — число выходных каналов дефектоскопа; V — скорость сканирования, мм/с; d — интервал дискретизации.

Рассмотрим, в качестве примера, контроль ТОТ ПГ, когда одновременно используются дифференциальный ВТП на трех частотах и абсолютный ВТП на одной частоте. Для такого режима работы дефектоскопа требуется 8 выходных каналов, так как $N = (3 + 1) \times 2$. При скорости сканирования 500 мм/с и интервале дискретизации 0,5 мм частота дискретизации АЦП дефектоскопа должна быть не менее 8 кГц.

Однако наиболее критичным к быстродействию дефектоскопа является контроль переключателей коллекторов ПГ. Этот контроль проводится с помощью вращающегося ВТП при скорости вращения 6000 об/с [4]. Скорость перемещения вихретоковых катушек относительно поверхности металла составляет примерно 4000 мм/с. По методике контроля [4] требуется использовать 4 частоты, то есть 8 выходных каналов. Таким образом, при интервале дискретизации 0,5 мм частота дискретизации АЦП дефектоскопа должна быть не менее 64 кГц.

8. Программное обеспечение дефектоскопа должно обеспечивать следующие возможности:

- управление параметрами режима работы аппаратной части дефектоскопа;
- автоматическая компенсация начального напряжения ВТП;
- автоматическая настройка по сигналам от искусственных дефектов;
- сбор вихретоковых данных и их отображение в реальном времени;
- цифровая обработка, в частности, цифровая фильтрация вихретоковых данных;
- комбинирование сигналов, полученных на разных частотах;
- различные виды порогов срабатывания сигнализации о наличии дефекта;
- возможность детального анализа вихретоковых сигналов с использованием разверток различных типов (временная

развертка, «комплексная плоскость», С-развертка и др.);

- автоматическое измерение параметров сигналов;
- обмен командами с системой управления манипулятором;
- печать результатов контроля;
- сохранение полной информации о контроле (общая информация, параметры режима контроля, полученные вихретоковые данные, реестр несплошностей, заключение).

Следует отметить, что должна быть возможность выполнить обработку и анализ собранных данных не только на самом дефектоскопе, но и с помощью отдельного компьютера, на котором установлено соответствующее программное обеспечение.

9. Основные погрешности дефектоскопа при измерении сигналов ВТП не должны превышать $\pm 10\%$ по амплитуде и $\pm 5^\circ$ — по фазе. Без выполнения этого условия невозможно обеспечить высокую достоверность результатов ВТК.

10. Дефектоскоп должен иметь возможность работы в дистанционном режиме. Анализ конструкций контролируемого оборудования и мест его расположения на АЭС показал, что для обеспечения дистанционности контроля требуется выполнение двух условий:

- длина кабеля от ВТП до электронного блока дефектоскопа не менее 30 м;
- длина линии связи от электронного блока дефектоскопа до управляющего компьютера не менее 200 м.

11. Для того чтобы иметь возможность сопряжения с различными сканирующими устройствами, дефектоскоп должен поддерживать современные технологии передачи данных, в частности, Ethernet. Кроме того, наличие в дефектоскопе достаточного количества цифровых входов и выходов значительно расширяют его возможности по организации совместной работы с такими устройствами.

12. Дефектоскоп должен быть надежным и удобным при эксплуатации. Конструкция дефектоскопа должна обеспечить легкость транспортировки к месту проведения контроля, возможность быстрой подготовки к работе и удобство при выполнении сбора и анализа вихретоковых данных. Корпус прибора должен быть ударопрочным.

13. В комплект поставки дефектоскопа следует включать дистанционное переговорное устройство. Это необходимо для работы в условиях повышенной зашумленности, а также при значительном удалении рабочего места оператора дефектоскопа от зоны контроля.

Пример выполнения требований

Как можно выполнить рассмотренные выше требования, проиллюстрируем на примере универсального вихретокового дефектоскопа КОМВИС ЛМ, который разработан специально для эксплуатационного контроля различных элементов оборудования АЭС и других промышленных объектов.

Этот дефектоскоп выполнен на базе мобильного промышленного компьютера (рис. 1), который имеет прочный алюминиевый корпус и встроенные периферийные устройства (монитор, клавиатура, TouchPad).



Рис. 1. Вихретоковый дефектоскоп КОМВИС ЛМ

На рис. 2 показано, как дефектоскоп КОМВИС ЛМ применялся при контроле сушильной башни ОАО «Истра-Нутриция».

Основные технические характеристики дефектоскопа КОМВИС ЛМ:



Рис. 2. Контроль сушильной башни с помощью дефектоскопа КОМВИС ЛМ

- число входных каналов: 2;
- число выходных каналов: 8;
- частотный диапазон от 1 до 1000 кГц;
- разрядность АЦП: 14 бит;
- частота дискретизации до 400 кГц;
- габаритные размеры: 357×418×177 мм; масса: 9,5 кг.

Число выходных каналов достаточно, чтобы проводить контроль одновременно на 4-х независимо выбранных частотах (при работе с одним ВТП). При этом используется параллельное возбуждение частот. На рис. 3 показана развертка «комплексная плоскость», на которой

отображены сигналы, полученные при контроле ТОТ ПГ с помощью внутреннего проходного дифференциального ВТП на 4-х частотах (30, 70, 140, 210 кГц). Источник сигналов: искусственная несплошность на наружной поверхности глубиной 20% от толщины стенки ТОТ.

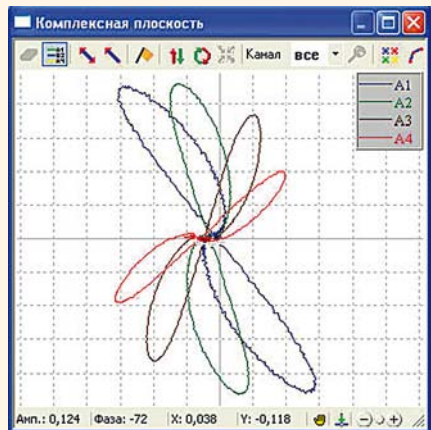


Рис. 3. Сигналы при контроле ТОТ ПГ на четырех частотах

Дефектоскоп КОМВИС ЛМ может работать практически с любыми типами ВТП. Примеры ВТП, которые могут войти в комплект дефектоскопа: внутренние проходные ВТП для контроля ТОТ конденсаторов турбин (рис. 4) и вращающийся ВТП для контроля перемычек коллекторов ПГ (рис. 5).



Рис. 4. ВТП для контроля ТОТ конденсаторов турбин



Рис. 5. Вращающийся ВТП для контроля перемычек коллекторов ПГ

Следует отметить, что для работы с вращающимися ВТП в дефектоскопе предусмотрен специальный канал для обработки синхроимпульсов, поступающих в дефектоскоп от ВТП для синхронизации разверток. В качестве примера на рис. 6 показана С-развертка, на которой отображены сигналы от двух искусственных несплошностей в металле коллектора ПГ. Длина несплошностей 10 мм, глубина 1 и 0,5 мм.

Программное обеспечение, установленное в дефектоскопе, предоставляет большие возможности при сборе и анализе вихретоковых данных. Многие

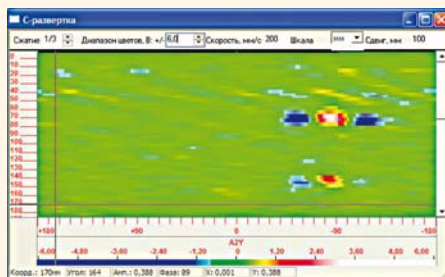


Рис. 6. С-развертка дефектоскопа КОМВИС ЛМ, используемая при контроле перемычек коллекторов ПГ

процедуры, такие как компенсация начального напряжения ВТП, настройка измерительных каналов по сигналам от искусственных дефектов, измерение параметров сигналов, формирование реестра несплошностей, подготовка протокола результатов контроля, выполняются автоматически.

Дефектоскоп может работать в составе автоматизированных систем контроля, в которые входят сканирующие устройства различных типов. В качестве примера таких устройств на рис. 7 изображен манипулятор установки СКР-140/170, предназначенной для контроля резьбовых отверстий на фланцах корпусов реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР 440. Проведено сопряжение дефектоскопа КОМВИС ЛМ с манипуляторами АСК-183 и МДПВ-02, обеспечивающими перемещение ВТП при контроле перемычек коллекторов парогенераторов ПГ.



Рис. 7. Манипулятор СКР-140/170

В случае, когда необходим дистанционный контроль, дефектоскоп можно использовать в двух вариантах. В первом варианте оператор работает непосредственно с самим дефектоскопом. Его рабочее место может быть удалено от контролируемого объекта за счет кабеля (соединяющего дефектоскоп и ВТП) длиной до 30 м. Во втором варианте для увеличения расстояния от рабочего места оператора до зоны контроля используется дополнительный управляющий компьютер, который может быть удален от дефектоскопа на расстояние до 1500 м.

Высокоскоростная передача данных между дефектоскопом и управляющим компьютером осуществляется по технологии VDSL.

Если система управления манипулятором содержит компьютер, то в общем случае организуется локальная сеть, состоящая из управляющего компьютера, дефектоскопа КОМВИС ЛМ и компьютера манипулятора.

Для работы в удаленном режиме к дефектоскопу прилагается дуплексное переговорное устройство позволяющее осуществлять голосовую связь на расстоянии до 200 м.

Заключение

Рассмотренные технические требования к вихретоковому дефектоскопу, предназначенному для работы на АЭС, были учтены при разработке Руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Вихретоковый контроль. РБ **-***-12», которое в настоящее время проходит стадию утверждения в Ростехнадзоре.

Литература

1. Кузнецов В.Б. Современные системы контроля и диагностики состояния металла парогенераторов АЭС с ВВЭР\РWR. — М.: МИИ, 1993. — 43 с.
2. Чертов С.И. Оборудование для многочастотного вихретокового контроля парогенераторов атомных электростанций. — В мире НК. 1999. № 6. С. 26–28.
3. РД ЭО 0664–2006. Общие технические требования к проведению контроля теплообменных труб парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000 (М) методом вихревых токов.
4. 27.28.05.050–2011. Методика контроля перемычек коллекторов теплоносителя ПГВ-1000 с использованием дефектоскопов КОМВИС ЛМ.
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code 2013. Section V, Article 8, Appendix VIII — Eddy Current Examination of Nonmagnetic Heat Exchanger Tubing.

Reference

1. Kuznetsov V. B. Sovremennye sistemy kontrolya i diagnostiki sostoyaniya metalla parogeneratorov AES s VVER\РWR. — Moscow: MII, 1993. — 43 p. (in Russ.).
2. Chertov S. I. — V mire NK [NDT World]. 1999, no. 6, pp. 26–28 (in Russ.).
3. RD EO 0664–2006. Obshchie tehicheskie trebovaniya k provedeniyu kontrolya teploobmennyh trub parogeneratorov PGV-440 i PGV-1000 (M) metodom vikhrevykh tokov.
4. 27.28.05.050–2011. Metodika kontrolya peremychek kollektorov teplonositelya PGV-1000 s ispolzovaniem defektoskopov COMVIS LM.
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code 2013. Section V, Article 8, Appendix VIII — Eddy Current Examination of Nonmagnetic Heat Exchanger Tubing.

Статья получена 21 октября 2013 г.