

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**А.Н. Аблеев, Б.Ф. Ануфриев, Е.М. Кудрявцев,
С.П. Мартыненко**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
«ДИАГНОСТИКА ЯЭУ»**

Под ред. Е.М. Кудрявцева

*Рекомендовано УМО “Ядерные физика и технологии”
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений*

Москва 2008

УДК 621.039.58 (076.5)

ББК 31.46.я7

Л12

Лабораторный практикум «Диагностика ЯЭУ»: учебное пособие / А.Н. Аблеев, Б.Ф. Ануфриев, Е.М. Кудрявцев, С.П. Мартыненко под ред. Е.М. Кудрявцева. – М.: МИФИ, 2008. – 60 с.

Лабораторный практикум по курсу «Диагностика ЯЭУ» создан на основе результатов научно-исследовательских работ кафедры конструирования приборов и установок МИФИ в области неразрушающего контроля и технической диагностики элементов конструкций ядерных реакторов.

Предназначен для ознакомления студентов с последними достижениями в указанной области, развития навыков самостоятельной исследовательской работы и умения использовать результаты исследований для решения практических задач диагностики элементов и конструкция ЯЭУ.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент д-р техн. наук И.А. Тутнов

ISBN 978-5-7262-0837-4

© Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2008

Редактор Т.В. Волвенкова

Подписано в печать 21.11.2008. Формат 60 x 84 1/16

Печ. л. 3,75 Уч.-изд. л. 4,0 Тираж 120 экз.

Изд. № 3/37 Заказ №

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)
115409, Москва, Каширское ш., 31

Типография издательства «Тровант»
г. Троицк Московской обл.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Лабораторная работа 1. Виброакустический контроль элементов ЯЭУ	5
Лабораторная работа 2. Акустико-эмиссионный контроль элементов ЯЭУ	22
Лабораторная работа 3. ЯМР-метод контроля влажности топливных таблеток	36
Лабораторная работа 4. Контроль однородности свойств материала оболочек твэлов энергетических ядерных реакторов	52

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные проблемы повышения надежности и безопасности ядерно-энергетических установок требуют разработки новых и освоения существующих методов неразрушающего контроля и диагностики элементов конструкций ядерных реакторов.

В настоящем практикуме приведены описания лабораторных работ, поставленных на кафедре «Конструирования приборов и установок» МИФИ, на основе развития перспективных и традиционных методов диагностики и неразрушающего контроля особо ответственных узлов и изделий ЯЭУ.

В лабораторный практикум по курсу «Диагностика ЯЭУ» вошли перспективные и оригинальные разработки, связанные с вибродиагностикой работающего оборудования ЯЭУ, акустико-эмиссионным контролем развивающихся дефектов (трещин) в конструкционных материалах энергетических реакторов, определением влажности топливных таблеток с помощью метода ядерного магнитного резонанса, а также исследованием упругой анизотропии материалов и изделий атомной отрасли. Все лабораторные работы созданы на базе научных разработок кафедры «Конструирования приборов и установок», внедряемых в реальное производство.

Для выполнения лабораторных работ необходимо использовать следующий список литературы.

1. Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 340 с.

2. Баранов В.М., Карасевич А.М., Сарычев Г.А. Испытания и контроль качества материалов и конструкций. – М.: Высшая школа, 2004. 360 с.

3. Ануфриев Б.Ф., Баранов В.М., Калядин А.Ю. Методика оценки анизотропии и уровня неоднородностей материалов с помощью ультразвуковых колебаний. //Реакторные испытания материалов. –М.: Энергоатомиздат, 1983, с.18-25.

4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1980. 976 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ВИБРОКУСТИЧЕСКАЯ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЯЭУ

Цель: ознакомление с основами виброакустического метода контроля компонентов энергетических ядерных реакторов.

Теоретическая часть

Вибрационная диагностика, основанная на регистрации и анализе колебаний (вибраций) объекта, является самым распространенным неразрушающим методом контроля работающих механизмов и оборудования. В настоящее время многие отрасли промышленности, включая атомную, активно решают задачу продления ресурса оборудования и снижения эксплуатационных расходов.

Различают три основные стратегии технического обслуживания оборудования:

- реагирующее техобслуживание, заключающееся в бесконтрольной работе оборудования до отказа. Этот метод приносит значительные убытки из-за простоев, необходимых для устранения непредвиденных аварий. В настоящее время он постепенно вытесняется из производственной сферы и используется, в основном, для дешевого вспомогательного оборудования;

- техобслуживание на базе планово-предупредительных ремонтов (ППР). Данный вид технического обслуживания заключается в проведении профилактических работ по плану-графику и является базовым для большинства предприятий, в том числе атомных станций. К сожалению, ППР не позволяет значительно снизить расходы на техобслуживание, так как не менее 50% из общего числа диагностических работ, предусмотренных регламентом, выполняются без их фактической необходимости;

- техобслуживание на основе оценки фактического состояния оборудования. Данный метод заключается в контроле за техническим состоянием оборудования с использованием современных средств технической диагностики и проведении

ремонтных работ только тогда, когда они действительно необходимы.

Мировой опыт свидетельствует, что техобслуживание по фактическому состоянию позволяет снизить (%):

- затраты на обслуживание на 75;
- количество обслуживаний на 50;
- число отказов оборудования на 70 за первый год работы.

Использование систем вибродиагностики для работающих механизмов, особенно роторных (вращающихся), является самым распространенным способом техобслуживания по фактическому состоянию. Существенные экономические выгоды при таком обслуживании достигаются благодаря

- возможности выявлять неисправности на ранней стадии их развития и, как следствие, избежать аварий и затрат на ликвидацию их последствий;
- практическому исключению непредвиденных остановок и неплановых простоев оборудования;
- повышению эффективности профилактических и ремонтных работ за счет определения реального технического состояния агрегатов.

Наиболее эффективно диагностируются узлы, являющиеся постоянным источником вибрации. К ним относятся:

- подшипники качения;
- подшипники скольжения;
- роторы машин;
- механические передачи, в том числе зубчатые, ременные, червячные и т.п.;
- редукторы;
- рабочие колеса насосов, турбин и т.п.;
- электромагнитные системы электрических машин.

В этих узлах на ранней стадии эксплуатации оборудования можно обнаружить имеющиеся дефекты. Слежение за их дальнейшем развитием позволяет составить долгосрочный и достоверный прогноз технического состояния машины.

Кроме того, вибродиагностика широко применяется для контроля особо ответственных конструкций, например, активной зоны реакторов ВВЭР при пусконаладочных работах и при их эксплуатации. Получаемая при этом информация позволяет

избежать многих непроектных ситуаций, связанных с монтажом, наладкой и эксплуатацией активной зоны.

Для вибродиагностики, как правило, используются сигналы акустических датчиков ускорения — акселерометров. Объясняется это тем, что разрушающее воздействие на узлы машин оказывают в основном переменные нагрузки, они же определяют ускорения элементов конструкций. В дальнейшем вибрационный сигнал подвергается обработке. Наиболее распространенным является спектральный анализ, основанный на преобразовании Фурье первичного периодического (временного) сигнала.

Спектральный анализ — это математический аппарат для исследования периодических процессов и выявления в них отдельных компонентов, имеющих характерные частоты. Колебательные силы и возбуждаемую ими вибрацию можно разделить на три основные составляющие — периодические, случайные стационарные и случайные нестационарные. Основной вид анализа первых двух групп составляющих — спектральный. Диагностическая информация об особенностях периодических сигналов может содержаться в таких его параметрах, как период, амплитуда и форма. В спектре сигнала это будут соответственно: частота основной гармоники ω_1 , уровень (амплитуда) основной гармоники A_1 и соотношение уровней (амплитуд) основной и кратных гармоник A_1/A_n .

Любой периодический вибросигнал $S(t)$ с периодом T можно разложить в ряд Фурье вида:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t),$$

где $\omega_1 = 2\pi/T$ — основная частота, n — номер гармоники.

Коэффициенты a_0 , a_n и b_n определяют по известным формулам:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \cos n\omega_1 t dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \sin n\omega_1 t dt.$$

Спектральный анализ позволяет наиболее полно изучать первичный сигнал и выявлять все особенности работающего механизма. Вместе с тем, для его анализа требуется высокая квалификации и опыт работы специалиста по неразрушающему контролю.

Другими распространенными способами обработки виброакустического сигнала являются следующие:

Частотная фильтрация сигнала — выделение информативной частотной компоненты в ограниченной полосе частот. Поступающий с вибродатчика сигнал пропускают через узкополосный фильтр, обычно с полосой пропускания шириной $\Delta f \ll f_0$, где f_0 — центральная частота полосы пропускания фильтра. С точностью до постоянного множителя уровень выходного процесса воспроизводит "вырезанную" по частоте часть входного процесса. Если форма частотной характеристики фильтра отлична от прямоугольной, вводится поправка, так называемый коэффициент формы.

Выделение огибающей - *амплитудное детектирование*. Проведение этой операции целесообразно, если процесс представляет собой сумму сигналов, которые могут быть описаны как синусоиды со случайными амплитудами и (или) фазами.

$$x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i(t) \sin[\omega_{0i} + \varphi_i(t)].$$

Здесь ω_{0i} - циклические частоты собственных колебаний; $\varphi_i(t)$ - случайные фазы колебаний; $A_i(t)$ - случайные амплитуды колебаний. Случайные амплитуды представляют собой медленно меняющиеся функции по сравнению со скоростью изменения отдельных компонент $A_i(t) \sin[\omega_{0i} + \varphi_i(t)]$ сигнала $x(t)$. Для колебаний с единственной частотой f_0 сущность детектирования

сводится к выделению функции $A(t)$. Частоту $f_0 = \omega_0/2\pi$, по аналогии с радиотехникой, называют *несущей частотой*.

Детектирование осуществляется с определенной степенью точности, поскольку процесс получения огибающей связан с усреднением процесса в течение промежутка времени, называемого *постоянной времени детектирования*. Если последняя мала, огибающая будет иметь пилообразный вид (плохое усреднение), если велика — огибающая не будет успевать отслеживать изменения амплитуды. Достаточной считают величину постоянной времени детектирования, равную по длительности трем — пяти периодам синусоиды. В то же время период для наивысшей по частоте составляющей в спектре огибающей не должен превосходить примерно половины постоянной времени детектирования.

Амплитудное детектирование позволяет следить за изменением уровня вибрации во времени, по которому может быть сделано заключение о состоянии диагностируемого объекта и дан прогноз о дальнейшем изменении уровня вибрации. Допустимое изменение уровня должно определяться на основе дополнительного изучения объекта или группы идентичных объектов, условий их эксплуатации, технических условий и другой нормативно-технической документации. Считается, что при нормальном техническом состоянии уровень вибрации изменяется случайным образом в пределах 1...1,2 дБ за 1000 часов работы.

Стробирование (временная селекция) — выделение из наблюдаемого процесса периодической составляющей, связанной с определенной фазой кинематического цикла работы механизма (устройства) циклического действия, рис. 1.1.

Устройства, осуществляющие стробирование, часто называют «временными воротами». Смысл стробирования заключается в том, что оно позволяет осуществить так называемое синхронное накопление полезного сигнала. При стробировании и синхронном накоплении изучаемые периодические сигналы складываются, их суммарная амплитуда растет пропорционально времени наблюдения. Сопутствующая случайная составляющая сигнала (помеха) из-за случайности ее фазы накапливает суммарную

амплитуду пропорционально квадратному корню времени регистрации.

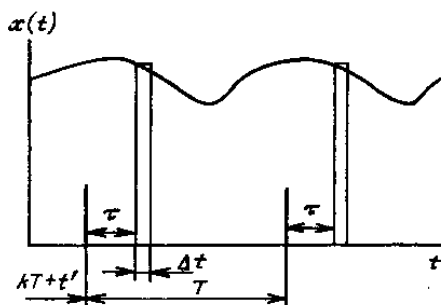


Рис. 1.1. Сущность операции стробирования

Следовательно, отношение сигнал/шум растет пропорционально корню времени, и чувствительность к периодической составляющей ограничивается лишь допустимым временем наблюдения, которое, в свою очередь, ограничено необходимым быстродействием диагностической системы.

Автокорреляционная функция (АКФ) является отражением спектральной плотности во временную область, а именно, ее обратным преобразованием Фурье. В свою очередь, спектральная плотность является прямым преобразованием Фурье от корреляционной функции. Поэтому использование корреляционной функции или спектральной плотности зависит от простоты аппаратной реализации. АКФ $K_x(\tau)$ стационарного процесса $x(t)$, имеющего нулевое среднее значение и среднеквадратическое отклонение σ_x , равна

$$K_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T\sigma_x} \int_0^T x(t)x(t-\tau)dt.$$

Чем больше абсолютная величина корреляционной функции, тем сильнее взаимосвязаны (взаимообусловлены) значения процесса, разделенные промежутком времени τ .

Взаимная корреляционная функция предусматривает совместный статистический анализ двух процессов. Если двумя датчиками регистрируют два различных физических процесса

$x(t)$ и $y(t)$ со среднеквадратическими значениями соответственно σ_x и σ_y , то взаимную корреляционную функцию этих процессов можно записать в виде

$$K_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt / \sigma_x \sigma_y.$$

Благодаря применению взаимной корреляционной функции удается измерить взаимообусловленность процессов, и за счет этого выделить полезные сигналы из шумоподобных и "зашумленных" процессов. Например, если два акустических датчика, расположенные в разных местах трубопровода, регистрируют шум истекающего газа, то определив, при каком значении аргумента функция K_{xy} имеет максимум, можно определить время запаздывания сигналов одного датчика по отношению к сигналам другого датчика, и этой характеристики определить координату утечки.

На рис. 1.2 показаны ориентировочные уровни и частотные диапазоны основных гармоник при различных отклонениях от нормальных режимов эксплуатации оборудования.

Диагностика узлов роторной машины позволяет автоматически получить полный диагноз состояния узлов при двух основных ограничениях.

Первое - стабильность частоты вращения диагностируемой машины во время каждого измерения вибрации. Именно выполнение этого условия позволяет эффективно использовать спектральные методы анализа периодических процессов с накоплением результатов, дающим возможность обнаружить даже слабые изменения в сигнале. Типовое время выполнения подобного измерения составляет величину, за которую контролируемый узел делает от нескольких десятков до нескольких сотен оборотов.

Второе – отсутствие ударных нагрузок в диагностируемом узле или машине во время измерений. Ударные нагрузки при отсутствии дефектов имеют место в узлах возвратно-поступательного действия, например, при смене направления движения поршня в двигателе. Аналогичная ситуация возникает в приводах прессов, а также машин, предназначенных для рубки и других операций ударного действия.

Ударные нагрузки возбуждают столь сильную вибрацию, что на ее фоне часто невозможно измерить параметры вибрации диагностируемых узлов.

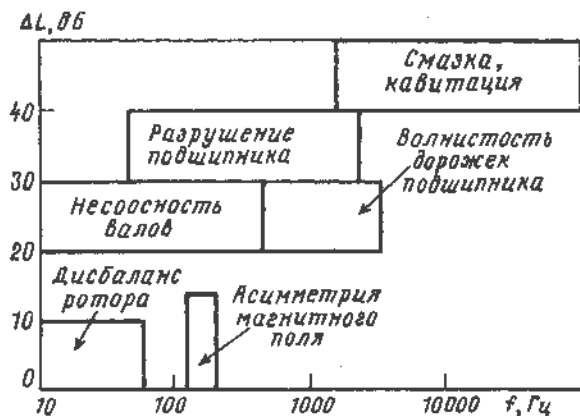


Рис. 1.2. Ориентировочные уровни и частотные диапазоны виброакустических сигналов при различных отклонениях от нормальных режимов эксплуатации

Это не означает, что в таких машинах невозможно обнаружить дефекты узлов возвратно-поступательного действия или развитые дефекты других узлов. Изменения параметров ударных нагрузок и возбуждаемой ими вибрации легко обнаруживаются при вибрационном мониторинге машины. Основной проблемой в этом случае является идентификация дефекта, который, как правило, при этом имеет недопустимо большие размеры, а состояние самой машины или узла близко к аварийному. Поэтому для проведения качественной диагностики машины с узлами возвратно-поступательного действия их на время диагностики других узлов стараются отключить или, по крайней мере, не нагружать.

Основной вид вибраций для роторного оборудования обусловлен *небалансом* его вращающихся частей, а основными частотами в спектре виброускорения являются – частота вращения, а также частоты, кратные частоте вращения (гармоники).

Контроль подшипников качения. Особую роль в работающих механизмах играют подшипники качения.

В результате износа во время эксплуатации машины в подшипнике качения могут возникнуть следующие дефекты, обнаруживаемые при анализе вибрационных сигналов:

- износ наружного кольца;
- раковины, трещины на наружном кольце;
- износ внутреннего кольца;
- раковины, трещины на внутреннем кольце;
- износ тел качения;
- сколы, трещины на телах качения;
- износ, трещины в сепараторе;
- дефекты смазки.

Разделить и классифицировать все виды указанных дефектов по результатам измерения вибрации крайне сложно, особенно в режиме автоматической диагностики и в машинах с априорно неизвестным техническим состоянием иных конструктивных элементов. Последние являются источником дополнительных неизвестных динамических нагрузок на диагностируемые подшипники.

Неисправный подшипник является источником вибрации на следующих основных частотах, кратных частоте вращения:

- 1-я — частота вращения сепаратора;
- 2-я — частота вращения тела качения;
- 3-я — частота перекатывания тел качения по внешнему кольцу;
- 4-я — частота перекатывания тел качения по наружному кольцу.

Эти частоты можно вычислить, зная размеры элементов подшипника (диаметры тел и дорожек качения), а также количество тел качения.

Как правило, частота перекатывания тел качения по внутренней дорожке качения составляет примерно 60% от частоты вращения умноженной на число тел качения. Предположим, что подшипник имеет 12 шариков и используется в машине с частотой вращения 3600 об/мин. Исходя из указанного правила, кратность частоты перекатывания по внутреннему кольцу от частоты вращения будет составлять $12 \times 0,6 = 7,2$, а сама частота равна $7,2 \times 3600 = 25920$ об/мин. Что касается внешнего кольца, примерно 40% шариков проходят через заданную точку за каждый оборот вала. Оценочное значение частоты перекатывания шарика по внешнему кольцу для

12-ти шариков и частоты 3600 об/мин будет определяться как $0,4 \times 12$ (частота вращения) и составит 17280 об/мин.

Необходимо помнить, что подобные вычисления являются приближенными. Реальные частоты перекатывания в зависимости от конфигурации подшипника могут значительно отличаться от указанных. В любом случае, знание частоты вращения шарика и частоты перекатывания полезно для анализа вибрации подшипника и получения дополнительной информации о причине его отказов.

При разрушении тел качения в результате неправильной смазки, перегрева или электрических повреждений, в частотном спектре вибраций первыми появляются дополнительные частоты кратные частоте вращения тел качения, а не частоте перекатывания.

Отметим, что ударное взаимодействие между телами качения и дорожками качения подшипника возбуждает колебания узлов машины и элементов самого подшипника на их собственных частотах, причем наиболее эффективно возбуждаются колебания, соответствующие низшим собственным частотам. Кроме того, дефекты подшипника также являются источником ударных нагрузок, вызывающих собственные колебания узлов диагностируемого механизма.

Проявление в спектре собственных частот колебаний элементов подшипника тесно связано с роторными частотами. Но в отличие от частот кратных частоте вращения, вибрация подшипника является результатом суперпозиции колебаний нескольких его элементов со своими собственными частотами и различной амплитудой колебаний.

Одиночный дефект на внутреннем или внешнем кольце подшипника генерирует вибрационный сигнал на частоте перекатывания тел качения. В процессе развития неисправности размер области повреждения возрастает, возникают новые дефекты. При этом в спектре появляются дополнительные частоты, а сам частотный спектр расширяется. Эти частоты модулируются частотой вращения вала за счет действия инерционных сил из-за дисбаланса вращающихся масс. В результате модулирования в спектре наблюдается большое число суммарно-разностных частот. Например, если машина работает на частоте вращения 3600 об/мин, а расчетная кратность частоты перекатывания шарика для дефекта на внутреннем кольце составляет 25292 циклов/мин, в спектре будут наблюдаться обе эти частоты. Кроме них проявятся

суммарная ($3600+25292=28892$ циклов/мин) и разностная частоты ($25292-3600 = 21692$ циклов/мин).

Если повреждения подшипника обусловлены усталостью материала, истиранием поверхностей или другими подобными эффектами, наблюдается высокочастотный вибрационный сигнал. В частотном спектре этого сигнала нет заметных максимумов, как при дискретном точечном выкрашивании дорожки качения. Уровень случайных вибраций также меняется случайным образом. Случайные вибрации могут быть как широкополосными, так и узкополосными. Исследование амплитудных и частотных характеристик случайных вибраций часто является полезным для понимания причин возникновения и опасности дефектов.

Описание установки

В настоящей работе исследуются спектры виброускорения, получаемые при небалансе вращающегося вала, закрепленного в изношенном подшипнике. Структурная схема лабораторного стенда показана на рис. 3. Стенд состоит из основания 1, на котором крепятся узлы установки – корпус вала 2, двигатель 7 и вибродатчик 9. Корпус 2 служит для установки вала 4 через два подшипника качения 3. Для вращения вала служит ременная передача 6, подсоединенная к двигателю 7. Источник питания 8 служит для питания двигателя 7 и регулировки скорости его вращения. Вибродатчик 9 (AP28) предназначен для регистрации виброускорения в точке установки. Он питается от блока питания 10, содержащего развязывающий фильтр и позволяющего снимать сигнал с датчика и предавать его на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП фирмы National Instruments) 11, производящий оцифровку первичного аналогового сигнала. Далее сигнал поступает на персональный компьютер (ПК) 12. Обработка сигнала производится с помощью программ, разработанных в среде структурного программирования LabVIEW. Эксцентрики 5 крепятся на вал и предназначены для моделирования разбаланса вала при его вращении.

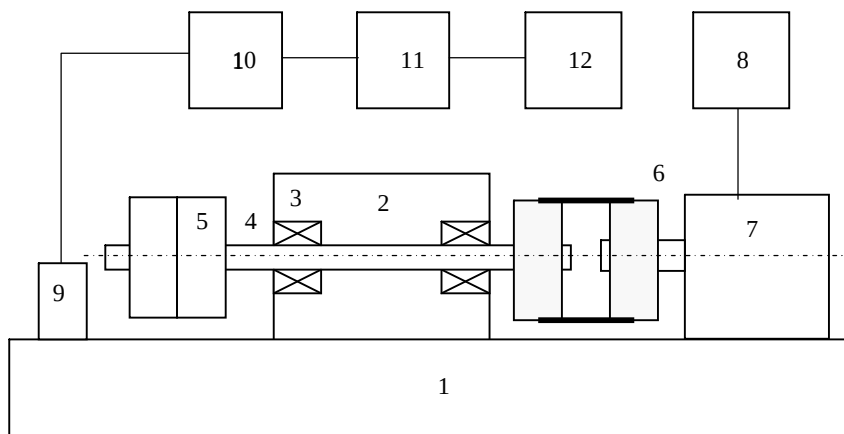


Рис. 1.3. Структурная схема вибростенда:

1— основание, 2— корпус, 3— подшипники качения, 4— вал, 5— эксцентрики, 6— ременная передача, 7— электродвигатель, 8— блок питания двигателя, 9— датчик виброускорения, 10— блок питания датчика, 11— АЦП, 12— компьютер

На рис. 1.4 показан внешний вид вибростенда. Изношенный подшипник 1 и эксцентрик 2 служат для создания повышенных вибраций и могут быть установлены на вал 5. Двигатель 3 через ременную передачу 4 обеспечивает вращение вала 5 с закрепленными на нем инерционными грузами 6. Крепеж 7 обеспечивает установку подшипников на вал 5. Сигнал виброускорения, снимаемый датчиком 8, поступает через схему, показанную на рис. 1.5, на АЦП лабораторного блока Elvis 9 и далее на ПК.

Передняя панель виртуального инструмента с первичными данными вибросигнала (верхний график) и его спектра (нижний график) показаны на рис. 1.6.

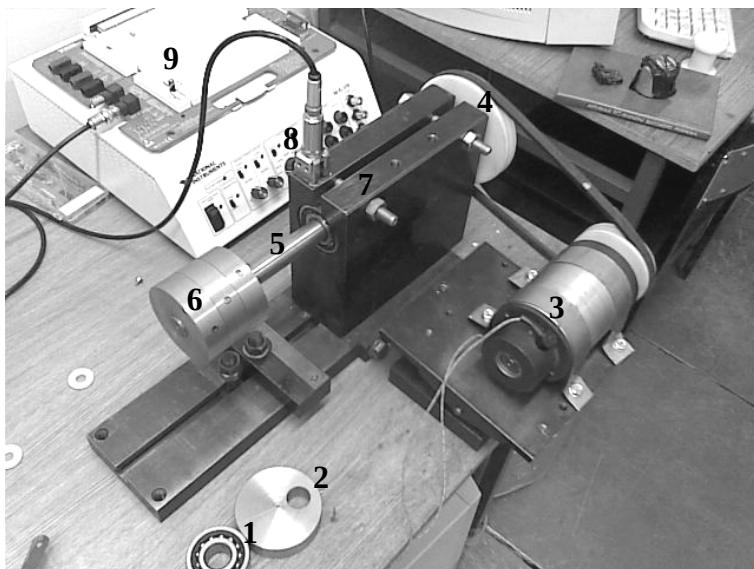


Рис. 1.4. Внешний вид вибростенда:

1 — сменный подшипник; 2 — эксцентрик; 3 — двигатель;
4 — ременная передача, 5 — вал, 6 — инерционные грузы, 7 — крепеж
подшипника, 8 — датчик виброускорения, 9 — лабораторный блок Elvis

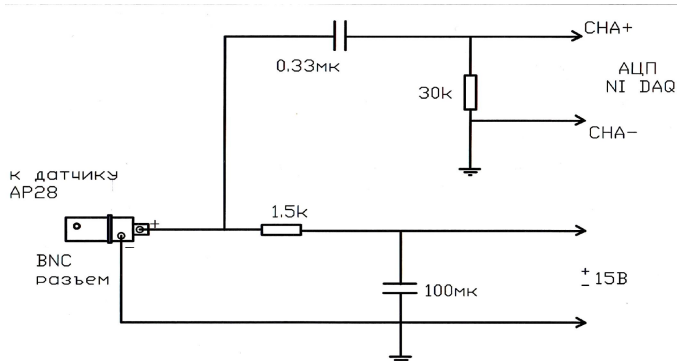


Рис. 1.5. Схема подключения датчика AP28

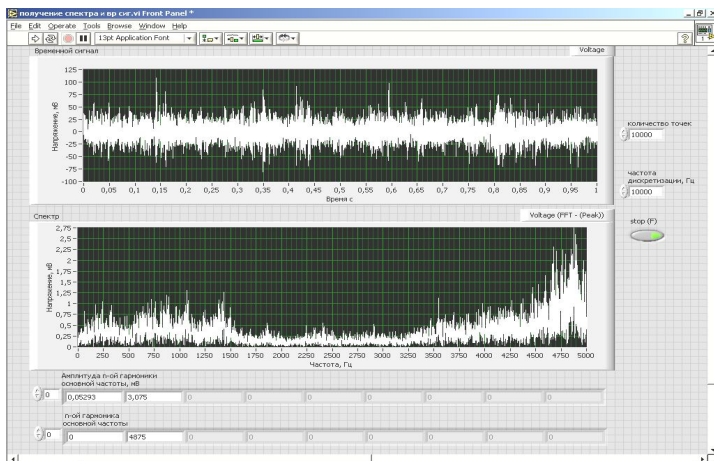


Рис. 1.6. Лицевая панель виртуального прибора

Частота вращения вала задается двигателем постоянного тока, подключенного к источнику питания. Градуировка угловой скорости вращения вала от напряжения источника питания указана на рис. 1.7.

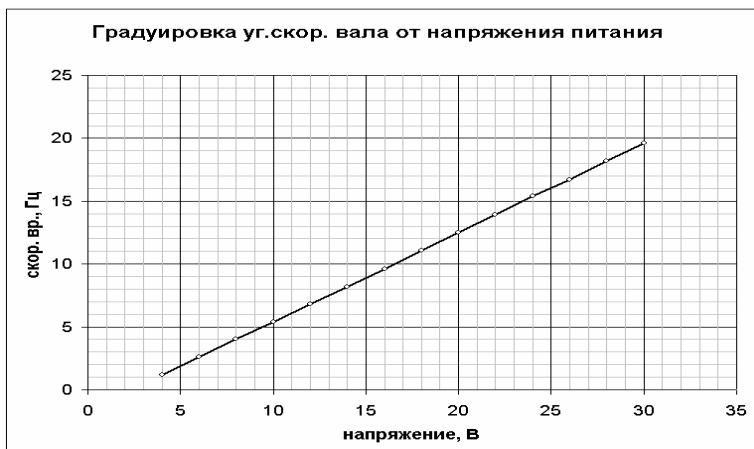


Рис. 1.7. Зависимость частоты вращения вала от напряжения питания двигателя

Порядок выполнения работы

Задание 1. Вибродиагностика исправного оборудования

1. Собрать установку по схеме рис. 1.3, установив новый подшипник и сняв эксцентрик.
2. Включить приборы и убедиться в их нормальной работе.
3. Запустить программу «vibro.vi». При этом на экране ПК отобразится передняя панель виртуального инструмента (рис. 1.6).
4. Включить двигатель.
5. Изменяя напряжение питания двигателя, добиться изменения скорости вращения двигателя.
6. Используя график рис. 1.7, определить частоту вращения двигателя для заданных значений напряжения. Записать вычисленные значения частоты в таблицу.
7. Наблюдать за изменением характера сигнала (рис. 1.6) на временном (верхнем) и частотном (нижнем) графиках при изменении напряжения питания двигателя.
8. Измерить частоту и амплитуду основной гармоники по частотному графику для разных скоростей вращения двигателя. Записать измеренные значения в таблицу.

Задание 2. Вибродиагностика неисправного оборудования

1. Установить на вал неисправный подшипник и эксцентрик. Для этого снять с вала 5 (рис. 1.4) инерционные грузы 6, ослабить зажатие крепежной пары 7 и снять с вала исправный подшипник. Затем вернуть вал в исходное состояние.
2. Изменяя напряжение питания двигателя, добиться изменения скорости вращения двигателя.
3. Используя график рис. 1.6, определить частоту вращения двигателя для заданных значений напряжения.
4. Используя теоретические представления и геометрические данные подшипника, оценить: частоту вращения сепаратора; частоту вращения тела качения; частоту перекатывания тел качения по внешнему кольцу; частоту перекатывания тел качения по наружному кольцу.
5. Записать вычисленные для каждого напряжения значения частот в таблицу.

6. Наблюдать за изменением характера сигнала (рис. 1.6) на временном (верхнем) и частотном (нижнем) графиках при изменении напряжения питания двигателя.

7. Измерить частоту и амплитуду основной и кратных гармоник, а также дополнительных пиков по частотному графику для разных скоростей вращения двигателя.

8. Записать измеренные значения в таблицу.

9. Сравнить вычисленные в п.4 значения частот с измеренными.

10. Сравнить уровень амплитуды на основной гармонике, полученной в Задании 1 (исправное оборудование) и Задании 2 (неисправное оборудование).

Пример.

Параметры подшипника и частоты появления дефектов:

Размеры подшипника: $d_{ш}=7,14$ мм, $D_0=34,00$ мм, $n=13$.

Частоты излучения дефектов на внешней и внутренней дорожках подшипника при $f_{вр}=19,6$ Гц:

$$f_{внешн}=100,6 \text{ Гц}, f_{внутр}=154,2 \text{ Гц}.$$

Частота дефекта шарика при $f_{вр}=19,6$ Гц:

$$f_{ш}=7,74 \text{ Гц}.$$

Контрольные вопросы

1. Каковы физические основы вибродиагностики работающего оборудования?
2. Какие виды дефектов можно определять с помощью вибродиагностики?
3. В чем суть спектрального анализа вибраций?
4. Какие методы обработки первичного сигнала вибраций вы знаете?
4. Укажите дефекты подшипников качения.
5. Какие частоты генерирует неисправный подшипник качения?

Список рекомендуемой литературы:

1. Введение в техническую диагностику потенциально опасных объектов атомной энергетики. Учебное пособие для вузов. /М.Б. Бакиров, Е.М. Кудрявцев, Г.А. Сарычев, И.А. Тутнов.— М.: РАДЭКОН, 2003. 39 с.
2. Диагностика материалов и конструкций топливно-энергетического комплекса / В.М. Баранов, А.М. Карасевич, Е.М. Кудрявцев и др. М.: Энергоатомиздат, 1999. 360 с.
3. Диагностика материалов и конструкций: Учебное пособие/ В.М. Баранов, А.М. Карасевич, Г.А. Сарычев М.: Высш. шк., 2007. – 380 с.: ил.
4. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. 2-ое изд. М.: Металлургия, 1985, 256.
5. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич и др. М.: Наука, 1998. 304с
6. Попков В.И., Мышинский Э.А., Попков О.И. Виброакустическая диагностика в судостроении. 2-е изд., перераб. И доп. Л.: Судостроение, 1989.-256с.
7. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Спб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 2000, 159 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЯЭУ

Цель: ознакомление с основами акустико-эмиссионного метода контроля компонентов энергетических ядерных реакторов.

Теоретическая часть

Акустическая эмиссия (АЭ) — возникновение в твердом теле упругих волн, вызванное изменением его состояния под действием внешних или внутренних факторов. Такое изменение всегда происходит дискретно. Кажущаяся непрерывность процессов, например, при деформировании металлов, отражает факт усреднения большого числа дискретных элементарных событий, каждое из которых приводит к микроскопическому деформированию. Большое количество элементарных событий, образующих последовательность (поток) событий, может привести к макроскопическим явлениям в твердом теле, сопровождающимся заметным изменением энергетического состояния тела, причем при освобождении энергии часть ее излучается в виде упругих волн. Возникновение таких волн и есть АЭ.

АЭ может проявляться двояко. Если число элементарных событий, приводящих к возникновению упругих волн, велико, а энергия, освобождаемая при каждом событии, мала, то АЭ-сигналы воспринимаются как слабый непрерывный шум, получивший название *непрерывной АЭ*. Из-за малости энергии, освобождаемой при единичном акте, энергетическое состояние тела меняется незначительно. Поэтому вероятность осуществления следующего такого акта практически не зависит от наличия предыдущего. Вследствие этого, физические характеристики непрерывной АЭ меняются со временем сравнительно медленно, что дает возможность описывать данный вид АЭ как квазистационарный процесс.

Если состояние твердого тела далеко от равновесного, возможны процессы лавинного типа, при которых за малый промежуток времени в процесс вовлекается большое количество элементарных событий. Энергия возникающей упругой волны может

на много порядков превосходить энергию упругих волн при непрерывной АЭ. Число отдельных энергетических скачков при этом существенно меньше, влияние каждого предыдущего акта на последующий становится существенным, и процесс возникновения упругих волн уже нельзя рассматривать ни как непрерывный, ни как стационарный. Подобная АЭ, характеризующаяся дискретностью и большой амплитудой регистрируемых импульсов, получила название *дискретной АЭ*.

Характерный пример дискретной АЭ — АЭ при распространении трещин в материале. Подрастание трещин, возникающее под действием внешних и внутренних факторов, имеет скачкообразный характер, при котором чередуются периоды стабильного состояния трещины при возможном увеличении пластической деформации у ее вершины, и периоды, когда трещина меняет свою длину с околосвуковой скоростью, переходя в новое состояние равновесия. Переход сопровождается упругой волной, регистрируемой преобразователем как сигнал дискретной АЭ. Возникающая АЭ служит предвестником разрушения задолго до его опасной стадии.

Обычно для прогнозирования разрушения используют дискретную составляющую АЭ ввиду простоты регистрации сигналов большой амплитуды. Помимо применения для диагностики состояния конструкций, дискретную АЭ используют при контроле технологических процессов, в ходе которых возможно образование трещин (сварки, закалки, диффузионного насыщения, например наводороживания), а также для исследований и контроля коррозионного растрескивания, прочности, в частности термопрочности, усталостного разрушения материалов, процессов трения и износа.

Характеристики сигналов акустической эмиссии. АЭ-сигналы характеризуются амплитудой, длительностью, формой, временем появления. Поток сигналов, кроме того, можно характеризовать статистически средней частотой событий, спектральной плотностью, амплитудным и временным распределениями, корреляционной функцией, средним значением, дисперсией. На практике трудно определить все параметры потока сигналов, обычно ограничиваются измерением нескольких основных характеристик, тем более что некоторые из них взаимосвязаны.

Потоком АЭ-сигналов называется последовательность импульсов, у которых случайными величинами является амплитуда и время появления. Поток сигналов можно характеризовать амплитудным, амплитудно-временным распределениями, средним значением амплитуды импульсов, дисперсией амплитуды, распределением временных интервалов между импульсами, средней частотой их появления, спектральной плотностью, корреляционной функцией. Каждая из характеристик связана с порождающим АЭ физическим процессом и содержит информацию о его развитии.

Для потока импульсов дискретной АЭ вводят следующие информативные параметры.

Общее число импульсов N_s — число зарегистрированных импульсов дискретной АЭ за время наблюдения.

Этот параметр используется для описания потоков неперекрывающихся импульсов, то есть импульсов, длительность которых меньше промежутков времени между ними. Общее число импульсов характеризует процессы, связанные с разрушением материалов, и указывает на число отдельных актов зарождения и распространения дефектов в конструкциях.

Активность АЭ — общее число импульсов, отнесенное к единице времени. Информативность этого параметра такая же, как и предыдущего, но с большей детализацией во времени, что позволяет проследить динамику процесса разрушения.

Суммарная АЭ — число зарегистрированных превышений (выбросов) АЭ-сигналов установленного уровня в течение заданного интервала времени.

В случае дискретной АЭ этот параметр характеризует число событий с амплитудой (и соответственно с энергией), превышающей установленное пороговое значение. При этом теряется часть информации, связанная с импульсами, амплитуда которых меньше установленного порога - уровня дискриминации.

Скорость счета $\dot{N}$ — число зарегистрированных превышений АЭ-сигналов установленного уровня в единицу времени.

Эта характеристика является производной суммарной АЭ по времени. Иногда ее называют интенсивностью АЭ.

Амплитудное распределение импульсов АЭ $n(A)$ — функция, указывающая количество импульсов АЭ, амплитуда которых заключена в малом интервале от A до $A + dA$, отнесенное к этому интервалу dA .

Амплитуда отдельных импульсов содержит информацию об энергии источника АЭ, а амплитудное распределение — об энергетическом распределении источников. Средняя амплитуда и средний квадрат амплитуды интегрально характеризуют энергию процесса, а дисперсия амплитуды импульсов — разброс энергии действующих источников АЭ.

Анализ амплитудного распределения позволяет получить информацию о физических процессах, сопровождаемых излучением АЭ. Например, он используется для идентификации механизмов деформирования металлов — деформирование скольжением или двойникование. Существенно различаются амплитудные распределения в условиях вязкого и хрупкого разрушения конструкций. Хрупкое разрушение характеризуется почти симметричным амплитудным распределением с высоким значением средней амплитуды. Для вязкого разрушения типично резко асимметричное распределение с большой долей импульсов малой амплитуды.

Изменение амплитудного распределения во времени, называемое *амплитудно-временным распределением*, отражает динамику физических процессов, сопровождаемых излучением АЭ. Амплитудно-временное распределение импульсов АЭ $n(A, t)$ — функция, указывающая количество импульсов АЭ dN , зарегистрированных в промежутке времени от t до $t + dt$, амплитуда которых заключена в интервале от A до $A + dA$:

$$dN = n(A, t) dA dt.$$

Сигнал АЭ может быть зарегистрирован на любой частоте, но амплитуда регистрируемого сигнала, как правило, убывает обратно пропорционально частоте. Естественным представляется стремление к регистрации АЭ-сигналов на низких частотах, тем более, что затухание упругих волн сильно возрастает с частотой. Однако с уменьшением частоты возрастают акустические помехи и флуктуационные электрические шумы преобразователя АЭ-

сигналов и электронной аппаратуры. Поэтому на практике рабочие частоты выбирают в полосе максимального отношения сигнал-шум.

Для непрерывной АЭ характерно проявление *эффекта Кайзера*, заключающегося в отсутствии АЭ при повторном нагружении объекта до ранее достигнутых напряжений. Практически АЭ при повторном нагружении начинает проявляться несколько раньше, чем достигается первоначальный уровень напряжений, а полностью восстанавливается несколько позже достижения этого уровня.

Эффект Кайзера не наблюдается при возникновении трещин, так как в этом случае средняя по объему образца деформация не характеризует деформацию отдельных его областей из-за наличия концентраторов напряжений и активации трещин. При повторном нагружении деформация вблизи вершин трещин может превзойти ранее достигнутую, что приведет к появлению АЭ.

На основании экспериментальных результатов предложены разные зависимости, характеризующие связь параметров АЭ и характеристик трещин с динамикой их роста. Однако подавляющая часть этих зависимостей лишь в той или иной степени описывает частные результаты. Наиболее универсальна, по-видимому, связь между общим числом импульсов N дискретной эмиссии и коэффициентом концентрации напряжений K , определяемая формулой $N = N_0 K^m$, где N_0 - константа, зависящая от материала и чувствительности регистрирующей аппаратуры. Показатель степени в зависимости от материала принимает значения из диапазона $m = 4...12$.

Наиболее перспективной областью практического применения АЭ считается обнаружение возникновения и развития трещин в материалах. Это связано с тем, что уже ранние стадии растрескивания материалов сопровождаются АЭ-сигналами, имеющими достаточно большую амплитуду. Достоинство систем АЭ-контроля и диагностики — возможность регистрации сигналов, возникающих на достаточно большом расстоянии от преобразователя, что позволяет не проводить сканирования объекта, присущего традиционным УЗ-методам контроля. Поэтому АЭ-системы практически безинерционны и потенциально более надежны из-за отсутствия перемещения преобразователей.

Контроль циркониевых уголков

В настоящей работе производится АЭ-контроль циркониевых уголков, используемых в качестве ребер жесткости в тепловыделяющих сборках (ТВС) реакторов ВВЭР-1000 и препятствующих их формоизменению в активной зоне реактора в течение всей кампании. Особенностью материала уголков является повышенная хрупкость и, как следствие, возможность образования трещин в местахгиба (отбортовки) при нормальных условиях или при эксплуатации. Суть применяемого АЭ-метода контроля заключается в регистрации ультразвуковыми датчиками, расположенными на концах контролируемого уголка, упругих волн, возникающих в металле при возникновении и скачкообразном подрастании микротрещин, и определении по разности времен прихода указанных волн линейной координаты микротрещин.

Особенностями применяемого в настоящей работе устройства являются его повышенная помехозащищенность и многофункциональность, позволяющие проводить отработку различных режимов контроля и оптимизацию отношения сигнал-шум в производственных условиях. Кроме того, разработанная установка максимально приближена к промышленному варианту, что позволяет применять ее для серийного контроля в производственных условиях. Процедура испытаний состоит в том, что циркониевые полосы после отбортовки устанавливаются на измерительную позицию, и в течение 1-3 минут в них регистрируются и определяются координаты акустических шумов, превышающих уровень дискриминации. Поскольку в лабораторных условиях отбортовка невозможна, в настоящей работе сигналы акустической эмиссии имитируются при помощи ударов кристалликов поваренной соли и (или) песчинок, падающих на уголок с высоты 10 см в точки с определенной координатой. При этом аппаратура автоматически определяет координаты источника акустической эмиссии, что и служит основой методики контроля. Технические характеристики установки приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1

Метод контроля	Акустико-эмиссионный
Вид контакта с объектом контроля	Иммерсионный
Длина контролируемого объекта, не более м	5
Минимальный размер контролируемого дефекта, мм ²	0,1
Погрешность определения координаты дефекта, мм	5
Диапазон частот, кГц	50-500
Количество каналов регистрации	2

Контроль производится автоматически с помощью ПК.

Описание установки

Измерительная система позволяет определять координаты и суммарную амплитуду сигналов от источников дискретной акустической эмиссии.

Схема лабораторного стенда показана на рис. 2.1. Стенд состоит из двух ультразвуковых датчиков 1 и 2, устанавливаемых на противоположных концах контролируемого уголка 3, блока аналоговой обработки сигналов 6, подключенного к датчикам через согласующее устройство 5, персонального компьютера 7 со встроенной платой сопряжения, а также программ сбора, обработки и протоколирования результатов контроля, разработанных в среде структурного программирования LabVIEW.

На рис. 2.1 приняты следующие обозначения: L_1 — расстояние от трещины до первого датчика; t_1 — время прихода сигнала от развивающейся трещины до первого датчика; L_2 — расстояние от трещины до второго датчика; t_2 — время прихода сигнала от развивающейся трещины до второго датчика.

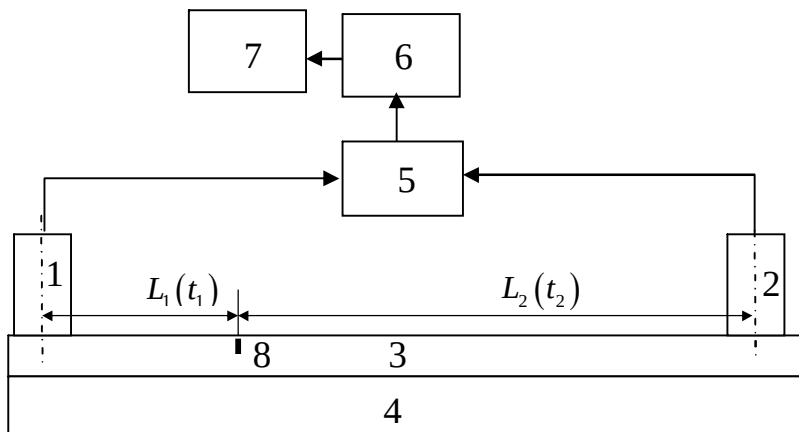


Рис. 2.1 Схема лабораторного стенда:

1, 2 — датчики; 3 — контролируемый уголок, 4 — звукоизолирующая подложка, 5 — согласующее устройство, 6 — блок обработки, 7 — персональный компьютер, 8 — трещина.

Для определения координаты развивающейся трещины используется разность времен прихода акустического сигнала на первый и второй датчики. Процедура определения координаты следующая. Если уровень сигналов, поступающих с датчиков, не превышает порог дискриминации, система находится в ждущем режиме. Если с одного из датчиков поступил сигнал, превышающий порог дискриминации, включается режим регистрации, в течение которого производится запись сигналов, поступивших с обоих датчиков. Далее измеряется максимальная амплитуда и время появления сигнала в каждом канале, которое определяется как момент превышения переднего фронта сигнала половины максимальной его величины. Длительность режима регистрации соответствует времени прохождения акустического сигнала по всей длине полосы. Дискретность регистрации координаты по длине составляет 5 мм. Кроме того, вычисляется средняя по двум датчикам амплитуда. Если следующий сигнал поступил из того же источника (положение, которого определяется с погрешностью 5 мм), то это приводит к увеличению суммарной средней амплитуды, соответствующей данной координате. Таким образом, за каждый цикл регистрации определяется амплитуда и координата источника единичного импульса, а за цикл измерения -

суммарные амплитуды и координаты всех источников с дискретностью примерно 5 мм.

Координата источника импульсов (см. рис. 2.1) вычисляется по формуле:

$$L_1 = [c(t_2 - t_1) + L]/2,$$

где c - скорость звука в циркониевой полосе, L — длина полосы (расстояние между датчиками).

Описанная выше процедура измерения позволяет уверенно определять источники дискретной АЭ на фоне существующих шумов и помех. Так, импульсные электромагнитные наводки, не поддающиеся фильтрации, влияют на оба датчика одновременно, что может приводить к росту суммарной амплитуды лишь в координате, соответствующей середине полосы. Здесь же (в середине полосы) оказывается и основная часть случайных шумов. Действительно, если на один из датчиков пришел случайный шумовой сигнал, превышающий уровень дискриминации, и включается режим регистрации, то от второго датчика запишется типичный шумовой сигнал без выраженного максимума, момент регистрации которого (середина переднего фронта) практически совпадет с моментом регистрации сигнала от первого датчика. Такой сигнал проявится в середине полосы.

Напротив, дискретные акустические импульсы из одного источника (например, от развивающейся микротрещины) поступают на оба датчика с запаздыванием и проявляются, таким образом, в виде подрастающей за несколько шагов амплитуды в определенной точке полосы, что и служит их отличительным признаком.

Недостатком такого подхода является возможный пропуск полезного сигнала от источника, расположенного посередине полосы (с погрешностью 5 мм), поскольку такой сигнал маскируется возможными импульсными электромагнитными наводками и случайными шумами. Кроме того, возможно возникновение фантомных разовых всплесков, связанных со случайным характером АЭ и переотражением первичных импульсов на концах полосы в течение цикла регистрации. Тем не менее, указанные недостатки не существенно уменьшают диагностические возможности метода.

На рис. 2.2 показана структурная схема измерительной системы АЭ-установки.

Сигнал с контролируемой полосы 1 поступает на пьезопреобразователи 2 и далее на предусилитель 4, размещенный с пьезопреобразователем в одном корпусе датчика 3. Далее сигнал по коаксиальному кабелю поступает на согласующее устройство 5, где он дополнительно усиливается регулируемым усилителем 6 и преобразуется в световой сигнал инфракрасными диодами 7. Световой поток через оптоволоконный кабель 8 поступает на блок обработки 9, гальванически развязанный с датчиками. Здесь световой сигнал с помощью фотоприемника 10 преобразуется в электрический сигнал, который усиливается усилителем 11 и поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) устройства ввода-вывода NI 16110 с частотой $2,5 \times 10^6$ выборок в секунду. Параллельно производится выделение огибающей принятых сигналов с помощью амплитудного детектора 12 и фильтра низкой частоты 13. Далее сумма сигналов огибающих поступает на компаратор 14, вырабатывающий импульс запуска АЦП. Порог дискриминации регулируется программно и задается внутренним цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) устройства ввода-вывода NI 16110.

Для проведения контроля были разработаны и изготовлены специализированные пьезодатчики. Частотный диапазон датчиков выбран на основании противоречивых требований, обусловленных с одной стороны низкими производственными шумами и наводками, а с другой - максимальной чувствительностью к развивающимся трещинам. На рис. 3 показана конструкция датчиков. Сигнал с пьезопреобразователя 1, демпфированного компаундом 2, по проводу 3 поступает на предусилитель 4 и далее по экранированному кабелю 5 – на блок аналоговой обработки сигналов. Пьезопреобразователь с предусилителем размещается в герметичном нержавеющей корпусе 6. Датчик прижимается к контролируемому объекту через слой глицерина 7 при помощи специальных пластиковых зажимов 9 пружиной 11. Для уменьшения контактных шумов служат накладки 8, выполненные из резины. Питание предусилителя происходит по сигнальному кабелю.

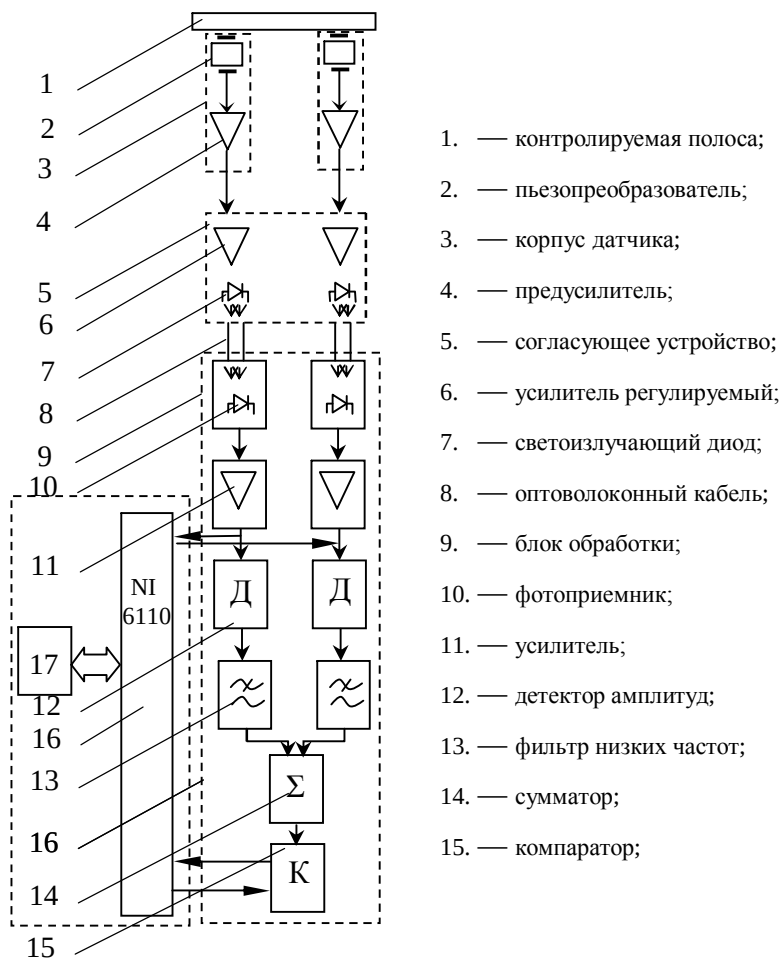


Рис. 2.2 Структурная схема измерительной системы

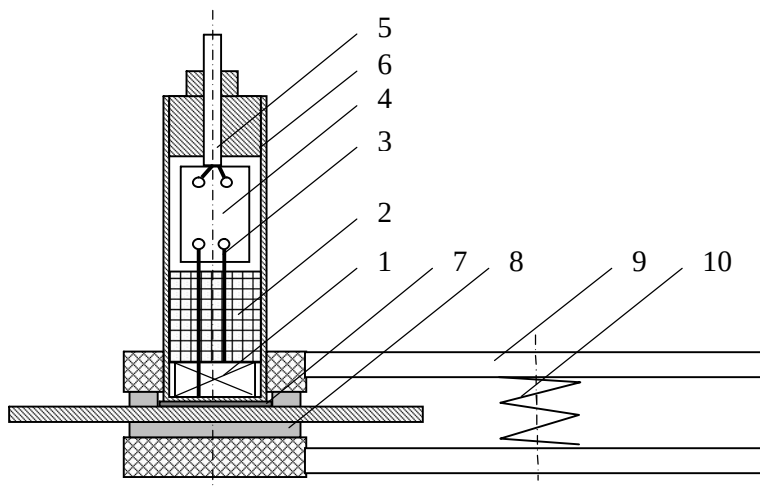


Рис. 2.3 Конструкция датчика:

1 — пьезопреобразователь; 2 — демпфер; 3 — сигнальный провод;
4 — предусилитель; 5 — коаксиальный кабель; 6 — корпус; 5 — слой
глицерина; 6 — резиновые накладки; 7 — зажим; 8 — пружина

Порядок выполнения работы

1. Включить ПК, согласующее устройство и блок обработки.
2. Запустить программу «АЭ-1». При этом на экране ПК отобразится передняя панель виртуального инструмента (рис. 2.4).
3. Установить пьезодатчики на краях контролируемого уголка через слой глицерина.
4. Проимитировать сигналы акустической эмиссии, посыпав кристаллы соли с высоты 10-20 см в двух-трех точках с различной координатой по длине уголка. При этом на верхнем графике рис. 2.4 наблюдаются первичные временные развертки сигналов АЭ от каждого из датчиков.
5. Установить значение дискриминации на уровне ниже амплитуды наблюдаемых импульсов так, как это показано на рис. 2.4.
6. Указать в графе «файл» путь для записи данных контроля.
7. Перезапустить выполнение программы.
8. Посыпать соль в несколько точек по длине уголка.

9. Наблюдать на нижнем графике (см. рис. 2.4) суммарные сигналы АЭ. Суммарная амплитуда пиков соответствует количеству импульсов от ударов кристаллов соли, а их координаты — точкам соударения.

10. На индикаторе «Суммарная АЭ» и «Скорость счета АЭ» автоматически отражаются соответствующие данные.

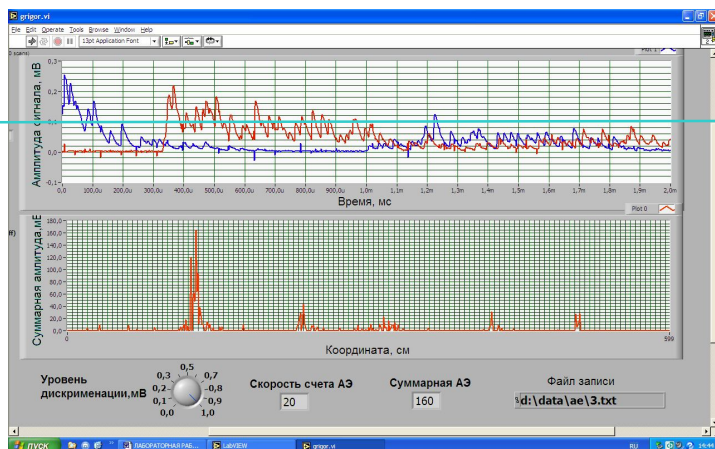


Рис. 2.4 Передняя панель виртуального инструмента для определения величины и координаты трещины в уголках

Таким образом, суммарная амплитуда пика (ось Y) характеризует величину (размер) возникшего дефекта (трещины), а положение по оси X — относительную его координату по длине уголка.

Контрольные вопросы

1. Какова природа акустической эмиссии в металлах?
2. Перечислите характеристики сигналов АЭ.
3. С какой целью используются циркониевые уголки в ТВС?
4. Какая методика определения координат развивающихся дефектов используется в настоящей работе?
5. Объясните структурную схему измерительного устройства.

Список рекомендуемой литературы

1. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. /В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич, Е.М. Кудрявцев, В.В. Ремизов, Г.А. Сарычев М.: Наука, 1998. 304 с.
2. Испытания и контроль качества материалов и конструкций. /В.М. Баранов, А.М. Карасевич, Г.А. Сарычев. М.: Высшая школа, 2004. — 360 с.
3. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С. и др. Разработка производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

ЯМР-МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК

Цель: ознакомление с основами метода ядерного магнитного резонанса применительно к контролю влажности топливных таблеток.

Теоретическая часть

Содержание влаги в порошках и таблетках из двуокиси урана строго ограничено.

Для порошков это связано, прежде всего, с безопасностью их хранения. Ядра атомов водорода (протоны) вследствие малой массы являются эффективными замедлителями нейтронов, и повышение их концентрации в диоксиде урана до определенного уровня в бункерах предварительного хранения может привести к спонтанной цепной ядерной реакции.

Влага, адсорбированная в таблетках, оказывает сильное коррозионное воздействие на циркониевые оболочки твэлов при их эксплуатации в активной зоне (АЗ) реактора вследствие образования гидрида циркония. Гидрирование оболочки происходит, как правило, локально в местах с концентрацией напряжений и наиболее благоприятной температурой. Места оболочки, подвергшиеся гидрированию, охрупчиваются и под воздействием существующих напряжений могут разрушаться до завершения сроков эксплуатации тепловыделяющей сборки (ТВС) в АЗ. Допустимое содержание влаги в таблетке ограничивается значением $(5 - 7) \times 10^{-4} \%$ по массе. При этом суммарное количество водорода для твэлов ВВЭР-1000 не должно превышать $9 \times 10^{-5} \%$ по массе.

В производственных условиях в настоящее время используются нейтронный (для порошка) и кулонометрический (для таблеток) методы измерения влажности.

Принцип действия кулонометрического датчика основан на поглощении влаги пленкой гигроскопического вещества (P_2O_5) и одновременном электролитическом разложении поглощенной влаги, количество которой определяется по току электролиза [2]. По измеренному количеству влаги определяют общее содержание водорода в таблетках. Продолжительность измерения составляет 15-20 мин [1]. Достоинством этого метода является высокая чувствительность и точность измерения. К недостаткам следует отнести длительное время измерения и то, что контроль является выборочным.

Для контроля содержания водорода в порошке двуокиси урана используют нейтронный метод. Преимущества нейтронного метода заключаются в возможности измерять непосредственно количество ядер водорода в большом объеме исследуемого материала. Недостатками метода являются высокая стоимость измерений, необходимость наличия квалифицированного персонала и необходимость защиты от биологических действий излучения.

В настоящей работе изучается альтернативный способ определения содержания водорода в двуокиси урана методом *ядерного магнитного резонанса*.

В основе метода ЯМР лежит резонансное поглощение электромагнитной энергии радиочастоты протонами воды в образце, помещенном в постоянное магнитное поле. Поглощение обусловлено переходами между энергетическими уровнями, образованными в результате взаимодействия магнитного момента протона с внешним магнитным полем. Информацию о количестве протонов получают из характеристик резонансного сигнала.

Явление ЯМР было открыто двумя независимыми группами исследователей [3], за что руководители групп Перселл и Блох были удостоены Нобелевской премии 1952 года.

Квантовая модель ЯМР

Многие ядра обладают отличным от нуля полным механическим моментом импульса $\hbar \vec{I}$ и магнитным моментом $\vec{\mu}$, который связан со спином ядра $\vec{I}$ соотношением $\vec{\mu} = \gamma \hbar \vec{I}$, где γ – гиромагнитное отношение, $\hbar$ – постоянная Планка. Энергия ядра E_0 , обладающего магнитным моментом, в отсутствие магнитного

поля не зависит от ориентации этого момента, т. е. состояние ядра вырождено по направлению магнитного момента (или по направлению спина).

При помещении ядра в магнитное поле $\vec{B}_0$ энергия E_0 получает добавку $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0$, обусловленную взаимодействием магнитного момента ядра с магнитным полем. Энергия становится зависимой от угла между векторами $\vec{\mu}$ и $\vec{B}_0$ (или от величины проекции магнитного момента на направление $\vec{B}_0$). Проекция m вектора $\vec{I}$ на направление магнитного поля может принимать значения $-I, -I+1, \dots, I-1, I$. Следовательно, проекции вектора $\vec{\mu}$ на это направление могут принимать значения $-\gamma\hbar I, -\gamma\hbar(I-1), \dots, \gamma\hbar(I-1), \gamma\hbar I$. Таким образом, вырождение по направлению магнитного момента снимается, и уровень E_0 расщепляется на $(2I+1)$ эквидистантных уровней энергии с расстоянием между уровнями $\Delta E = \gamma\hbar B_0$.

В термодинамическом равновесии отношение населенностей уровней задается распределением Больцмана $N_2/N_1 = \exp\{-(E_2 - E_1)/k_B T\}$, где k_B – постоянная Больцмана. Подвергнем полученную систему облучению электромагнитным полем. Согласно квантовомеханическим правилам отбора разрешены переходы только между соседними уровнями $\Delta m = \pm 1$.

Таким образом, электромагнитное поле с частотой ω_0 , кванты энергии которого совпадают с ΔE , будет вызывать резонансные переходы между уровнями. Это явление и называется ядерным магнитным резонансом [3]. Условием резонанса является выполнение соотношения $\hbar\omega = \Delta E$, откуда $\omega_0 = \gamma B_0$.

Спин интересующего нас ядра водорода $I = 1/2$. Следовательно, в магнитном поле уровень энергии расщепляется на два уровня, соответствующие проекциям спина на направление магнитного поля $m = 1/2$ и $m = -1/2$.

Магнитный момент протона равен

$$\gamma = \frac{2\mu_p}{\hbar} = 2,675 \cdot 10^4 \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{Гс}},$$

а величина расщепления составляет

$$\Delta E = 1,8 \cdot 10^{-11} \frac{\partial B}{\text{Гс}} = 1,8 \cdot 10^{-7} \frac{\partial B}{\text{Тл}}.$$

Резонансная частота при этом равна

$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 4,258 \frac{\kappa \Gamma \text{ц}}{\text{Гс}} = 42,58 \frac{M \Gamma \text{ц}}{\text{Тл}}$$

Классическая модель

Совпадение результатов квантовой и классической теорий позволяет излагать особенности явления ЯМР, используя классическую векторную модель ядра [3].

Рассмотрим ядро с магнитным моментом $\vec{\mu}$ в магнитном поле $\vec{B}_0$ с классической точки зрения. Изменение во времени механического момента ядра $\hbar \frac{d\vec{I}}{dt}$ равно вращающему моменту $[\vec{\mu} \times \vec{B}_0]$, действующему на магнитный момент $\vec{\mu}$ со стороны поля $\vec{B}_0$, тогда можно записать

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \gamma [\vec{\mu} \times \vec{B}_0],$$

с частотой прецессии $\omega_0 = \gamma B_0$.

Теперь рассмотрим не одиночный магнитный момент, а ансамбль прецессирующих моментов, с чем и приходится иметь дело в реальном веществе. В результате распределения Больцмана число магнитных моментов, направленных по полю, превышает число магнитных моментов, направленных против поля. Вследствие этого создается макроскопическая намагниченность $\vec{M}_0$. Фаза вращения каждого момента вокруг $\vec{B}_0$ произвольна, и поперечная составляющая намагниченности отсутствует. Подействуем на эту систему переменным магнитным полем $\vec{B}_1$ с круговой поляризацией, вращающимся с резонансной частотой ω_0 в плоскости, перпендикулярной направлению поля $\vec{B}_0$ (плоскость ХУ), в направлении прецессии магнитных моментов.

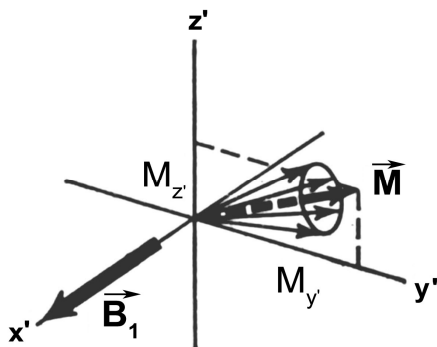


Рис. 3.1 Поворот магнитных моментов и макроскопической намагниченности

Перейдем в систему координат, связанную с вектором $\vec{B}_1$. Относительно этой системы координат вектор $\vec{B}_1$ покоится, и магнитные моменты и, следовательно, макроскопическая намагниченность прецессируют относительно направления вектора $\vec{B}_1$ с частотой $\omega_1 = \gamma B_1$ [3] (рис. 3.1). При импульсном воздействии полем $\vec{B}_1$ импульс, поворачивающий вектор намагниченности на угол 90° ($\gamma B_1 t_u = \pi/2$), называется 90° -импульсом ($\pi/2$ - импульсом), а импульс, поворачивающий вектор намагниченности на угол 180° ($\gamma B_1 t_u = \pi$), называется 180° -импульсом (π - импульсом).

Вернемся в лабораторную систему координат XYZ. После действия 90° -импульса вектор макроскопической намагниченности прецессирует в плоскости XY вокруг $\vec{B}_0$. Таким образом, возникает поперечная составляющая намагниченности. Вследствие этого сумма поперечных составляющих магнитных моментов $M_\perp$ уменьшается с постоянной времени T_2 , так что

$$M_\perp = M_0 \exp(-t/T_2).$$

Этот процесс называется *спин-спиновой релаксацией*, а время T_2 называется *временем спин-спиновой (или поперечной) релаксации*.

Уменьшение поперечной составляющей макроскопического момента происходит также из-за неоднородности внешнего магнитного поля. Постоянную времени в этом случае обозначают T_2^* . Вследствие взаимодействия ядер с окружением (решеткой) система приходит в состояние теплового равновесия, и продольная составляющая намагниченности M_z восстанавливается с постоянной времени T_1 :

$$M_z = M_0 \{1 - \exp(-t/T_1)\}.$$

Этот процесс называется *спин-решеточной релаксацией*, а время T_1 называется временем *спин-решеточной (или продольной) релаксации*.

Значения T_1 в жидкостях и твердых телах меняются в широких пределах – от 10^{-4} до 10^4 с. Значения T_2 в жидкостях обычно одного порядка с T_1 , однако в твердых телах оно, как правило, значительно короче ($10^{-4} - 10^{-5}$ с).

Основные методы наблюдения ЯМР

В эксперименте внешнее магнитное поле создается постоянными магнитами или электромагнитами. В создаваемых магнитных полях резонансная частота электромагнитного излучения лежит в диапазоне радиочастот, и переменное магнитное поле создается катушкой, ось которой направлена перпендикулярно внешнему магнитному полю. Катушка создает линейно осциллирующее поле $B_K = 2B_1 \cos \omega t$, которое может быть представлено в виде суперпозиции двух вращающихся в противоположные стороны полей с круговой поляризацией и амплитудой B_1 . Резонансное воздействие осуществляется компонентой, имеющей соответствующее направление вращения. Вторая компонента дает малый эффект. Сигнал ЯМР получается с помощью высокочастотной катушки, расположенной перпендикулярно внешнему магнитному полю: прецессирующие магнитные моменты создают переменный магнитный поток через витки катушки, вследствие чего в катушке наводится регистрируемая э.д.с. Одна катушка может выполнять роль одновременно возбуждающей и приемной (рис. 3.2).

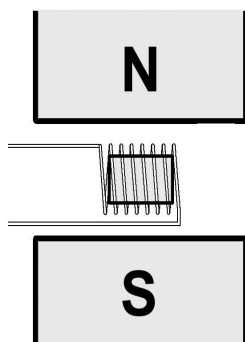


Рис. 3.2 Схема эксперимента по ЯМР

Ядерный магнитный резонанс может наблюдаться с помощью непрерывных и импульсных методов.

Непрерывные методы основаны на медленном прохождении через резонанс — $\omega = \gamma B_0$. Образец постоянно подвержен действию высокочастотного поля, и условие резонанса достигается путем медленного изменения частоты или магнитного поля. В зависимости от фазы, в которой регистрируется сигнал, можно наблюдать сигнал поглощения или сигнал дисперсии (рис. 3.3).

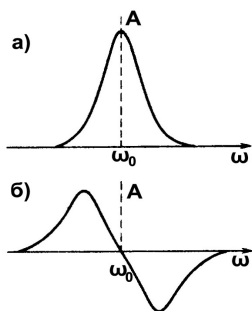


Рис.3.3 Зависимость поглощения (а) и дисперсии (б) от частоты

Наилучшим образом эти методы реализуются при использовании сложных магнитных систем со сверхпроводящими магнитами. Однако при использовании обычных магнитных

систем, имеющих неоднородность поля 10^{-3} - 10^{-4} , непрерывные методы имеют невысокую чувствительность.

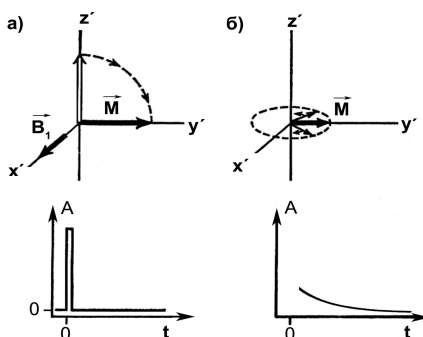


Рис. 3.4 Одноимпульсная схема: а) возбуждение и амплитуда возбуждающего импульса; б) релаксация и амплитуда сигнала свободной прецессии

В импульсных методах воздействие высокочастотным полем осуществляется короткими мощными импульсами, и регистрируется отклик от образца. Наиболее распространены следующие импульсные схемы. В одноимпульсной схеме образец подвергается действию $\pi/2$ -импульса. После действия импульса прецессирующий макроскопический магнитный момент (поперечная составляющая) создает переменный поток через витки катушки; в катушке наводится э.д.с. (сигнал свободной прецессии). Вследствие процессов релаксации поперечная составляющая момента уменьшается, и сигнал свободной прецессии спадает [3], (рис. 3.4).

Если неоднородность магнитного поля такова, что $T_2^* \ll T_2$, происходит более быстрый спад сигнала свободной прецессии. В этом случае возможна реализация метода спинового эха, суть которого заключается в следующем, (рис. 3.5). После действия $\pi/2$ -импульса (а) происходит быстрый спад сигнала свободной прецессии (б). Через время τ после $\pi/2$ -импульса подается π -импульс (в), в результате которого моменты ядер поворачиваются на π относительно оси X' и за счет неоднородности внешнего поля

через время 2τ происходит собирание ядерных магнитных моментов и, следовательно, возникновение сигнала спинового эха (г,д,е). Однако амплитуда сигнала спинового эха меньше амплитуды сигнала свободной прецессии вследствие спин-спиновой релаксации.

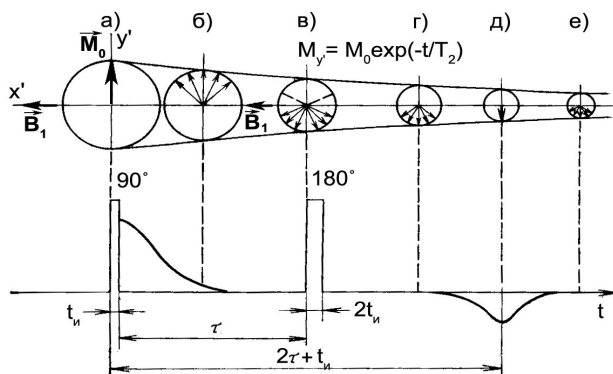


Рис.3.5 Формирование сигналов свободной индукции и спинового эха в неоднородном поле B_0

Импульсные методы менее требовательны к однородности магнитного поля, чем непрерывные, и хорошо реализуются при использовании несложных магнитных систем, что является их преимуществом. Эти методы являются инструментом для исследования релаксационных процессов системы, дающим, как и непрерывные методы, информацию о состоянии ядер.

Описание установки и проведение измерений

Установка содержит магнитную систему на постоянных магнитах, обеспечивающую создание однородного магнитного поля в центральной части зазора между полюсными наконечниками в объеме 1 см^3 , датчик ЯМР, обеспечивающий возбуждение и регистрацию ВЧ-сигнала, электронный блок приема обработки и формирования возбуждающей последовательности и персональный компьютер, осуществляющий управление работой релаксометра. Установка позволяет наблюдать сигналы ЯМР (сигнал свободной прецессии и сигнал спинового эха) на частоте $10,76 \text{ МГц}$ в образце размером $\varnothing 10 \times 10 \text{ мм}^3$. Установка управляется

от персонального компьютера, работающего на языке структурного программирования NI LabVIEW. Структурная схема установки показана на рис. 3.6.

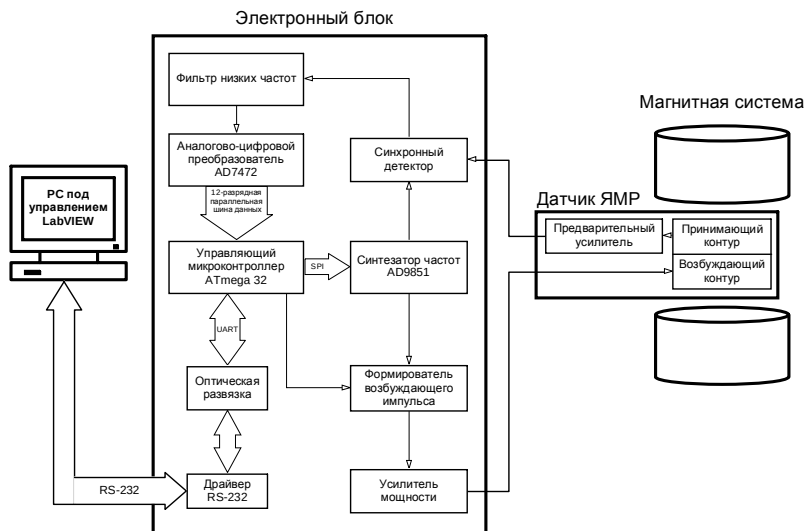


Рис. 3.6 Структурная схема установки

Магнитная система представляет собой два постоянных магнита со следующими параметрами:

магнитное поля в рабочем зазоре B_0 0,21 Тл;

относительная неоднородность поля
в объеме образца менее 10^{-4} ;

Датчик ЯМР — скрещенные возбуждающая и приемная катушки в составе колебательных контуров. Использование конструкции со скрещенными катушками позволяет снизить воздействие возбуждающего импульса на приемную систему. Для получения однородного высокочастотного поля в объеме образца возбуждающая катушка выполнена в виде соосно расположенных соленоидов (катушка Гельмгольца). Для увеличения отношения «сигнал/шум» образец должен как можно больше заполнять объем приемной катушки. Оба контура – возбуждающий и приемный, настраиваются на резонансную частоту, причем добротность приемного контура должна быть не меньше 60. Контур

размещены в медном экранирующем корпусе. В этом же корпусе располагается предварительный усилитель.

Электронный блок состоит из следующих частей: управляющий микроконтроллер; синтезатор частот; формирователь сигнала возбуждения; усилитель мощности; синхронный детектор и низкочастотный фильтр; аналогово-цифровой преобразователь.

Установка работает следующим образом. На основе введенных пользователем данных электронный блок формирует возбуждающий импульс заданной частоты и длительности, который поступает на возбуждающий контур. Сигналы свободной прецессии и спинового эха, наведенные в приемном контуре, усиливаются, фильтруются, оцифровываются и поступают для обработки на ПК, где анализируется амплитуда принятого сигнала.

Измерение содержание водорода в исследуемом образце проводится в три этапа:

- настройка системы на резонанс и определение резонансной частоты;
- получение градуировочной зависимости на малых количествах глицерина;
- измерение влажности имитаторов таблеток диоксида урана (имитаторы выполнены из окиси алюминия).

1. **Настройка на резонанс** осуществляется с использованием программы Res.vi. Ее передняя панель представлена на рис. 3.7.

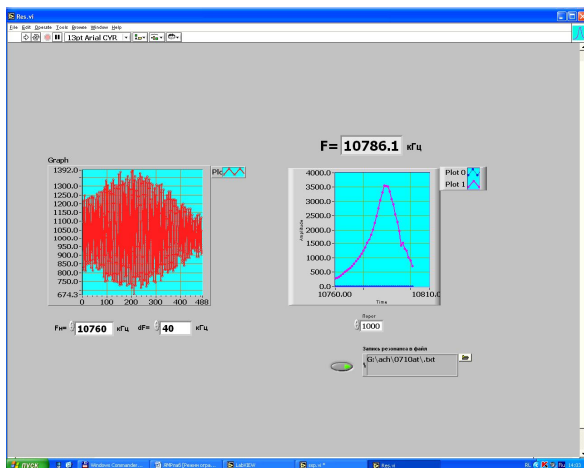


Рис. 3.7 Панель измерителя резонансной частоты

В магнитную систему помещается ампула с глицерином объемом 1мл. Прибор устанавливается в режим регистрации спинового эха. Выбирается начальная частота качания 10700 кГц и девиация 100 кГц. Программа запускается нажатием клавиш Ctrl+R. При этом происходит сканирование в выбранном частотном диапазоне и отображение формы принятого сигнала спинового эха и зависимости амплитуды от частоты возбуждающего сигнала. Если частотный диапазон выбран верно, то зависимость имеет ярко выраженный максимум в форме резонансной кривой. Резонансная частота определяется автоматически. Полученное значение резонансной частоты при необходимости может быть уточнено при повторном сканировании в более узком частотном диапазоне.

2. **Получение градуировочной зависимости** может проводиться как с использованием сигнала свободной прецессии (ССП), так и на основе сигнала спинового эха. В этом случае используются соответственно программы ssp.vi или echo.vi. Соответствующие передние панели виртуальных приборов изображены на рис. 3.8 и 3.9.

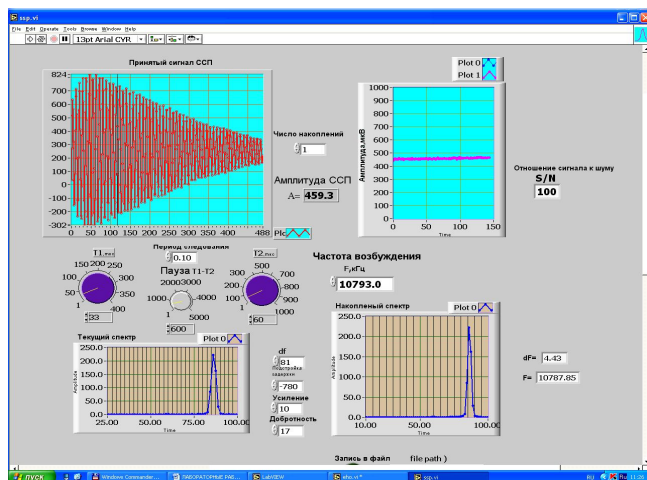


Рис. 3.8 Панель регистратора СПП

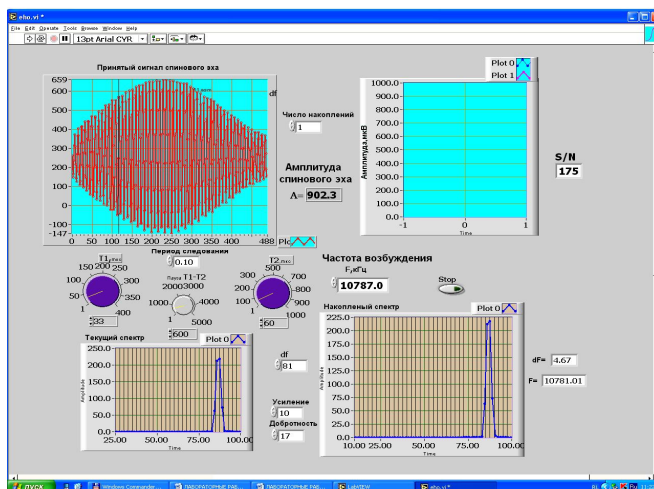


Рис. 3.9 Панель регистратора спинного эха

В измерительный объем помещается капилляр с заданным количеством глицерина. Поскольку амплитуда полезного сигнала может быть меньше уровня шумов аппаратуры, измерение проводится методом накопления, то есть регистрируется сумма сигналов при многократном повторении эксперимента. Это позволяет добиться увеличения отношения сигнала к шуму в $\sqrt{N}$ раз. Полученный сигнал подвергается Фурье преобразованию и определяется амплитуда максимума сигнала A , см. рис. 9. Эксперимент повторяют для различных количеств глицерина. На основании полученных данных строят градуировочную зависимость измеренных амплитуд от содержания водорода.

3. Измерение влажности имитаторов производится путем измерения амплитуды принимаемого сигнала эха с последующим пересчетом по полученной градуировочной зависимости. Количество накоплений N выбирают исходя из необходимой чувствительности и определяется приемлемостью времени эксперимента, длительность которого растет пропорционально N .

Примечание:

Для настройки системы на резонанс используют сигналы свободной прецессии и спинного эха от 1 мл глицерина. На рис. 3.10 представлена осциллограмма принятого низкочастотного сигнала. Он содержит возбуждающий $\pi/2$ -импульс, за которым следует сигнал свободной прецессии, затем следует π -

импульс и далее сигнал спинового эха. Выбор глицерина обусловлен оптимальными временами релаксации. Сопоставимость на осциллограмме наведенного сигнала от возбуждающих импульсов и регистрируемых сигналов ЯМР является следствием насыщения усилителя во время действия импульсов. Сигнал от 1 мл глицерина ярко выражен. При регистрации гораздо меньшего количества вещества используют дополнительную обработку сигнала.

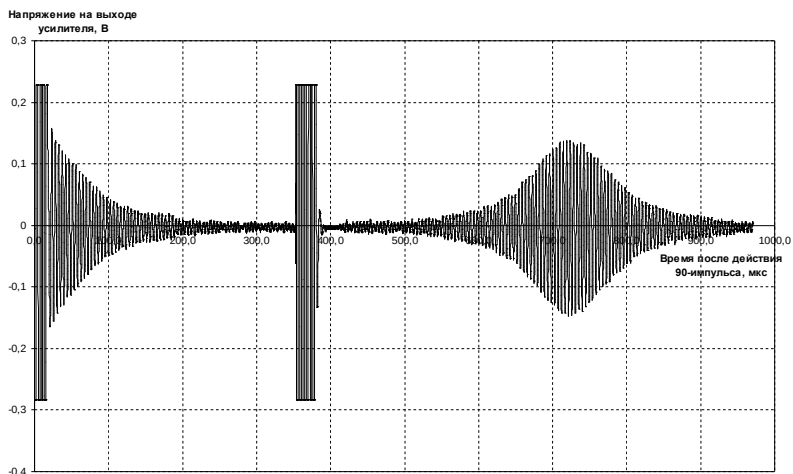


Рис. 3.10 Осциллограмма усиленных сигналов свободной прецессии и спинового эха от 1мл глицерина

С использованием описанной методики получают зависимости амплитуды сигнала спинового эха от массы водорода в составе глицерина (рис. 3.11).

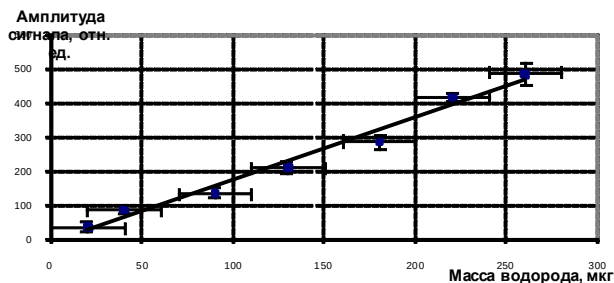


Рис. 3.11 Зависимость амплитуды сигнала спинового эха от массы водорода в составе глицерина

Таблетка оксида алюминия (совпадающая по геометрическим параметрам с топливной таблеткой) используется в качестве модельного объекта. Для оценки погрешности амплитуды сигнала используется среднеквадратичное отклонение амплитуды. Зависимость в пределах погрешностей измерения представляет собой прямую, проходящую через начало координат.

Следует отметить, что использование спинового эха позволяет добиться большей чувствительности метода. В твердых веществах присутствующая влага может находиться в связанном состоянии. В этом случае время спин-спиновой релаксации меньше, по сравнению с условным, когда влага находится в свободном состоянии. По этой причине амплитуда спинового эха может быть меньше амплитуды сигнала свободной прецессии. Тогда следует пользоваться измерениями ССП.

Порядок выполнения работы

1. Включите ПК, согласующее устройство и блок обработки.
2. Поместите в измерительный объем капсулу с 1 мл глицерина.
3. Запустите программу `res.vi` и настройте систему на резонанс.
4. Поочередно помещая в измерительный объем капилляры с различным (известным) значением глицерина, с помощью программ `ssr.vi` и `eho.vi` проведите измерения амплитуд ССП и спинового эха. Количество накоплений следует выбирать таким, чтобы отношение сигнал/шум не опускалось ниже 5.
5. Постройте градуировочную зависимость амплитуд ССП спинового эха от количества водорода в пробе.
6. В программе `Exel` постройте таблицы зависимостей амплитуд ССП и спинового эха от количества водорода в пробе.
7. По данным таблицы постройте графики этих зависимостей.
8. С помощью метода наименьших квадратов определите параметры установленных линейных зависимостей.
9. Проведите измерение амплитуд ССП и спинового эха на образцах-имитаторах таблеток.
10. Пересчитайте их в количество водорода с использованием полученных соотношений.
11. Сравните результаты, полученные разными способами и оцените погрешность измерений.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность явления ЯМР?
2. Какие параметры используются для измерения влажности методом ЯМР?
3. От каких характеристик аппаратуры зависит чувствительность метода?
4. В чем различие использования в методике измерения ССП и спинового эха.

Список литературы

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. В 2 кн. Кн. 1. / Под ред. Ф.Г. Решетникова. М.: Энергоатомиздат, 1995.
2. Берлинер М.А. Измерения влажности. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1973.
3. Эндрю Э. Ядерный магнитный резонанс. М.: Издательство иностранной литературы, 1957.
4. Дэроум Э. Современные методы ЯМР для химических исследований: Пер. с англ. М.: Мир, 1992.
5. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 2002.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

КОНТРОЛЬ ОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Цель: ознакомление с импедансным акустическим методом неразрушающего контроля и его применением для контроля однородности материала оболочек твэлов ядерных реакторов, а также получение новых данных о влиянии технологии изготовления на качество твэлов.

Теоретическая часть

Контроль качества оболочек твэлов ядерных реакторов является неотъемлемой составляющей реакторной технологии. Оболочки контролируются на предприятии-изготовителе, различными физическими методами с целью обнаружения геометрических несовершенств, поверхностных дефектов (рисок, царапин), неоднородности свойств материалов и других характеристик, существенно определяющих работоспособность твэла. Особое значение контроль состояния материала приобретает при отработке технологии изготовления оболочек, например, в связи с изменением технических требований на эксплуатируемый объект или при проектировании нового аппарата.

Одним из перспективных методов контроля состояния материала тонкостенных труб является акустический импедансный метод, основанный на определении акустического импеданса в зоне контакта поверхности контролируемого объекта с некоторым колеблющимся телом (например, металлическим стержнем прямоугольного или квадратного сечения). Под акустическим импедансом понимают отношение переменной силы в зоне контакта к колебательной скорости, вызванной этой силой. Это отношение зависит от упруго-пластических свойств соприкасающихся тел в зоне контакта и существенно определяет характер колебаний обоих тел. Если известны свойства одного из тел (стержня), то свойства другого тела (оболочки) могут быть определены по параметрам колебаний одного или обоих тел.

Согласно рассматриваемому варианту импедансного метода

колеблющийся стержень, называемый в дальнейшем измерительным, с помощью фиксированной силы приводят в упругий контакт с объектом контроля и по изменению резонансной частоты измерительного стержня судят о свойствах контролируемого объекта. В работах [1-3] показано, что таким способом могут быть определены характеристики упругости и вязкоупругости, твердости, ползучести, анизотропии материала. Контроль указанных характеристик или их совокупности позволяет выявить неоднородности материала. Данный метод контроля является не только неразрушающим, но и неповреждающим, так как измерительный стержень (обычно с закаленным шариком на конце, соприкасающимся с контролируемым объектом) практически не оставляет следов на поверхности объекта ввиду малой величины нагрузки, прилагаемой к стержню.

Если в измерительном стержне прямоугольного сечения возбуждают резонансные изгибные колебания, соответствующие собственной частоте изгибных колебаний с номером n , то приращение резонансной частоты Δf_n , обусловленное контактом стержня с объектом контроля, составит величину [3]:

$$\Delta f_n = \frac{hC_0}{4\sqrt{3}\pi l^2} (\alpha_n^2 - \alpha_{n0}^2). \quad (4.1)$$

Здесь h — ширина грани стержня, параллельной плоскости колебаний; $C_0 = \sqrt{E_0/\rho_0}$ — скорость распространения упругих волн в материале стержня; E_0 и ρ_0 — модуль Юнга и плотность материала стержня; α_{n0} и α_n — корни характеристических уравнений, описывающих колебания стержня до и после приведения его в контакт с объектом контроля соответственно и имеющих вид:

$$1 + \cos \alpha_{n0} ch \alpha_{n0} = 0, \quad (4.2)$$

$$\frac{\alpha^3}{3} \frac{1 + \cos \alpha_n ch \alpha_n}{\cos \alpha_n sh \alpha_n - \sin \alpha_n ch \alpha_n} = \frac{l^3}{3E_0 J_0} \frac{2,26G^* \sqrt{S_k}}{1 + a_1 G^*}. \quad (4.3)$$

В уравнении (3): l — длина стержня; $J_0 = h^4/12$ — момент инерции поперечного сечения стержня относительно нейтральной

плоскости, перпендикулярной плоскости колебаний; S_k — площадь проекции поверхности контакта на поверхность объекта; $a_1 = c_1/c_2 G_0^*$; $G_0^* = G_0/(1 - \nu_0/2)$; $G^* = G/(1 - \nu/2)$; G_0, ν_0, G, ν — модуль сдвига и коэффициент Пуассона материалов стержня и объекта контроля соответственно; c_1, c_2 — константы, определяемые при градуировке измерительного устройства.

Анализ формулы (4.1) и решений уравнений (4.2) и (4.3) приводит к следующим выводам:

1. Относительное приращение резонансной частоты измерительного стержня в результате его контакта с объектом контроля тем больше, чем меньше n , то есть чувствительность метода растет с понижением рабочей частоты. Последнее, однако, связано с уменьшением эффективности работы преобразователей и увеличением влияния вибраций и окружающих шумов на работу аппаратуры. Компромиссным является выбор рабочей частоты в диапазоне единиц или немногих десятков килогерц.

2. Если последовательно возбудить колебания измерительного стержня в направлениях 1 и 2, параллельных его граням, то соответствующие приращения Δf_{n1} и Δf_{n2} резонансных частот f_{n1}^0 и f_{n2}^0 стержня при контакте с объектом контроля связаны с модулями сдвига G_1 и G_2 в направлениях 1 и 2 соотношением

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{\Delta f_{n1} f_{n1}^0}{\Delta f_{n2} f_{n2}^0}, \quad (4.4)$$

то есть отношение $\Delta f_{n1} f_{n1}^0 / \Delta f_{n2} f_{n2}^0$, определяемое из экспериментальных данных, является мерой анизотропии характеристик упругости материала объекта контроля.

Располагая образец, представляющий собой отрезок оболочки твэла, таким образом, что направления 1 и 2 соответствуют осевой (продольной) l и тангенциальной (окружной) φ координатам оболочки, определяют коэффициент упругой анизотропии материала оболочки:

$$K_G = \frac{G_\varphi}{G_l} = \frac{\Delta f_{n\varphi} f_{n\varphi}^0}{\Delta f_{nl} f_{nl}^0}. \quad (4.5)$$

Измерение коэффициента K_G вдоль образующей оболочки твэла позволяет оценить степень неоднородности ее материала. Анализируя полученную зависимость в осевом направлении, можно выявить степень структурной неоднородности материала оболочки путем расчета дисперсии величины K_G . Кроме того, с помощью Фурье-анализа зависимости $K_G(l)$ могут быть выявлены характерные периоды изменения упругой анизотропии вдоль образующей оболочки. Для этого функцию $K_G(l)$, заданную на отрезке $0 \leq l \leq L$ в N точках, представляют в виде многочлена [4]:

$$K_n(l) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=0}^{n-1} A_p \sin\left(2\pi \frac{p}{L} l + \varphi_p\right) + \frac{a_n}{2} \cos\left(2\pi \frac{n}{L} l\right), \quad (4.6)$$

где $n = \frac{N+1}{2}$; $A_p = \sqrt{a_p^2 + b_p^2}$; $\varphi_p = \arctg \frac{a_p}{b_p}$; $p = 0, 1, 2, 3, \dots, n$;

a_p, b_p – коэффициенты разложения функции $K_G(l)$ в ряд Фурье. Последний член выражения (4.6) возникает только в случае четного N . Вычисления коэффициентов a_p, b_p проводят по формулам:

$$a_p = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} K_G(l_k) \cos\left(2\pi \frac{k}{N} p\right); \quad (4.7)$$

$$b_p = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} K_G(l_k) \sin\left(2\pi \frac{k}{N} p\right). \quad (4.8)$$

Необходимые расчеты выполняют с помощью персонального компьютера, вводя массив экспериментальных данных в программу спектрального (гармонического) анализа системы MATLAB. Анализируя полученную зависимость, выявляют характерные периоды изменения анизотропии упругих свойств вдоль образующей контролируемой оболочки, свидетельствующие о неоднородности структурного состояния материала твэльных труб.

Таким образом, как абсолютные значения приращений частот измерительного стержня, так и их отношения, полученные для различных точек контакта с поверхностью изделия, могут быть использованы для контроля состояния материала.

Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки показана на рис.4.1. Вдоль желоба основания 1 перемещается контролируемый образец 2 в виде отрезка оболочки твэла, в контакт с которым приводится измерительный стержень 3 с заделанным в его нижний конец шариком из закаленной стали.

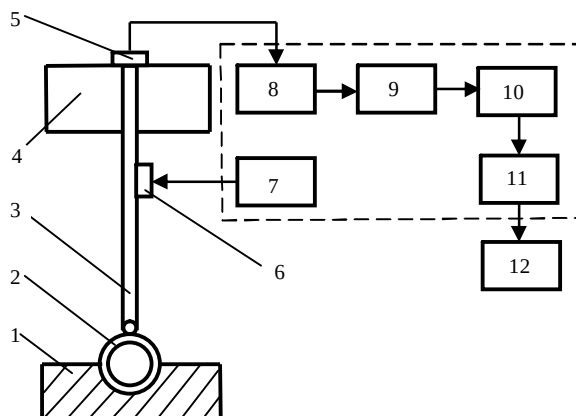


Рис. 4.1 Структурная схема установки

Верхний конец стержня заделан в массивный цилиндр 4, который может перемещаться в вертикальном направлении. На измерительном стержне размещены возбуждающий колебания пьезоизлучатель 6 и воспринимающий колебания стержня пьезоприемник 5. Пьезоизлучатель соединен с синтезатором частоты 7, обеспечивающим генерацию сигнала возбуждения датчика. Сигналы пьезоприемника усиливаются усилителем 8, детектируются в блоке детектирования 9, преобразуются в аналого-цифровом преобразователе 10 в цифровой код и через устройство сопряжения 11 считываются персональным компьютером 12. Блоки измерительной системы 7-11 конструктивно объединены в единый блок генерации и регистрации. Управление режимами, обработка и протоколирование полученных данных осуществляется ПК при помощи программ, написанных в среде структурного программирования «LabVIEW».

Принцип измерений резонансных частот стержня заключается в следующем. Синтезатор частот, работающий в режиме генератора качающейся частоты ГКЧ, возбуждает пьезоизлучатель в заданном интервале частот. Соответственно изменяется амплитуда сигнала пьезоприемника, отображаемого после электронной обработки на экране персонального компьютера в виде амплитудно-частотной характеристики. В момент резонанса стержня амплитуда регистрируемых пьезоприемником и отображаемых на экране ПК сигналов достигает максимального значения и в этот момент происходит фиксация частоты возбуждаемых колебаний.

Конструкция измерительного узла установки, обеспечивающей автоматический или при необходимости ручной режим контроля, показана на рис. 2. Исследуемая оболочка 2 устанавливается на ролики 1 конвейера, создающего ее прерывистое поступательное движение. Конвейер представляет собой обойму 17 с двумя ведущими и пятью свободно вращающимися роликами, закрепленную в нижней части корпуса 3 установки с помощью винтов 18.

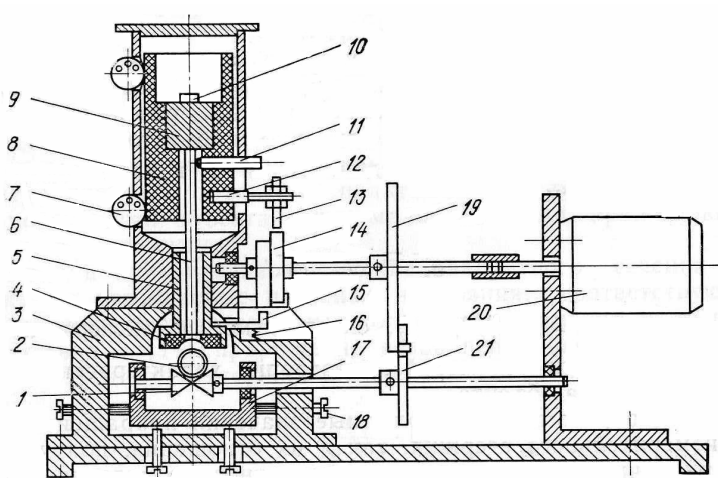


Рис. 4.2. Конструкция измерительного узла установки

Измерительный стержень 6, выполненный из тонкого стального бруса прямоугольного сечения $3,0 \times 3,2$ мм и длиной 85

мм, заделан в металлический цилиндр 9, запрессованный в текстолитовую втулку 8. Возбуждающий колебания стержня пьезоизлучатель 11, представляющий собой цилиндрический столбик из пьезокерамики ЦТС-19, закреплен во втулке таким образом, что пьезоэлемент находится в контакте с ребром стержня под углом 45° к его граням. Подобное расположение пьезоизлучателя обеспечивает эффективное возбуждение резонансных колебаний стержня в двух взаимно перпендикулярных направлениях, нормальных граням, и уменьшает влияние преобразователя на колеблющуюся систему. Пьезоприемник 10 поджат к торцевой поверхности цилиндра 9, жестко соединенного с измерительным стержнем.

Втулка 8 с закрепленными в ней преобразователями и измерительным стержнем может вертикально перемещаться внутри корпуса установки по направляющим качения 7, при этом грани измерительного стержня ориентированы вдоль образующей оболочки и перпендикулярно к ней. Перемещение втулки осуществляется с помощью закрепленного в ней толкателя, состоящего из двух скрепленных стержней 12 и 13. Нижний конец стержня 13 находится в контакте с поверхностью двухпрофильного кулачка 14, служащего для периодического подъема и опускания измерительного стержня 6. Кулачок связан с валом электродвигателя 20. Второй профиль кулачка предназначен для управления периодическим перемещением «вверх-вниз» устройства, демпфирующего колебания оболочки в процессе измерений. Демпфирующее устройство содержит металлическую оправку 5 с фторопластовой пластиной 4, являющейся демпфером, и толкатель 15, поджимаемый к поверхности кулачка пружиной 16. Нижним демпфером для контролируемой оболочки служат ролики, обтянутые резиной.

Прерывистое поступательное перемещение оболочки при контроле в автоматическом режиме осуществляется с помощью электродвигателя и мальтийского механизма, содержащего колесо с кривошипом 19 и трехпазовый мальтийский крест 21. Вал мальтийского креста соединен с валом ведущего ролика 1 конвейера. Мальтийский механизм и диаметр ведущего ролика рассчитаны так, что шаг сканирования оболочки составляет 6 мм. В автоматическом режиме контроля в момент остановки оболочки к

ней подводятся сверху демпфер и измерительный стержень, производится регистрация резонансных частот последнего, затем демпфер и стержень приподнимаются, оболочка перемещается на 6 мм и процесс измерений повторяется.

Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

1. Ознакомиться с теоретической частью работы и уяснить физические принципы, лежащие в основе методики контроля.

2. Включить ПК и блок генерации и регистрации акустических сигналов.

3. Установить контролируемый отрезок оболочки твэла в зажимное приспособление измерительного узла установки.

4. Определить резонансные частоты свободного измерительного стержня f_{nl}^0 и f_{np}^0 в осевом и окружном направлениях оболочки.

Примечание: номер возбуждаемой формы колебаний измерительного стержня уточнить у преподавателя.

5. Включить ручной или автоматический режим работы установки (по указанию преподавателя) и провести измерения резонансных частот измерительного стержня f_{nl} и f_{np} при контакте его с оболочкой в различных точках вдоль образующей. Полученные данные записать в файлы данных или занести в таблицу (при ручной обработке результатов).

6. Повторить измерения по п.5, поворачивая оболочку на угол $30^\circ n$ ($n=1,2, \dots$) вокруг собственной оси.

Примечание: объем измерений по пп. 5 и 6 задается преподавателем.

7. Вычислить (при ручной обработке результатов) средние значения резонансных частот свободного измерительного стержня и приведенного в контакт с оболочкой. Найти среднеквадратическую погрешность измерений при доверительной вероятности 0,95.

8. Определить величину приращений резонансных частот Δf_{nl} и Δf_{np} измерительного стержня в различных точках поверхности оболочек.

9. Рассчитать по формуле (4.5) коэффициент упругой

анизотропии для различных зон поверхности оболочки в осевом и окружном направлениях.

10. Построить по полученным данным зависимости анизотропии модуля сдвига от линейной и угловой координат и проанализировать полученные результаты.

11. Определить методом гармонического анализа возможные периоды изменения коэффициента K_G вдоль образующей оболочки. Результаты гармонического анализа представить в виде зависимости логарифма отношения коэффициента A_p , (см. формулу 4.6), к наименьшему значению $A_{p\min}$ от величины $1/T_p$, обратной периоду функций $A_p \sin\left(2\pi \frac{p}{L} l + \varphi_p\right)$.

12. Составить письменный отчет о лабораторной работе, который должен содержать:

- структурную схему измерений;
- таблицы результатов измерений и расчетов;
- графические зависимости измерения коэффициента K_G материала оболочки в осевом и окружном направлениях;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются физические основы контроля анизотропии тонкостенных труб импедансным акустическим методом?

2. Какая характеристика является мерой анизотропии?

3. В чем достоинства и недостатки рассматриваемого метода контроля?

4. Каковы возможные причины выявленных неоднородностей материала оболочки твэла?

5. Укажите источники систематических и случайных погрешностей при определении коэффициента упругой анизотропии.

6. Какие пути и меры совершенствования методики измерений и установки вы можете предложить?