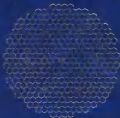


W.B. Anderson, R.M. Flaxman, A.M. Thomas

Reproductive success: an introductory essay



Springer

Г. В. Аркалов В. И. Павелко А. И. Усанов

ВИБРОШУМОВАЯ ДИАГНОСТИКА ВВЭР

Под редакцией члена корреспондента РАН А. А. Абаганя

Москва Энергоатомиздат 2004

Аркадов Г. В. Павелко В. И., Усатов А. И. Виброшумовая диагностика ВВЭР/ Под ред. А. А. Абакина. — М.: Энергоатомиздат, 2004. — 344 с.: ил. ISBN 5-283-00787-1

Рассмотрены основы инженерно-акустической теории энергетического реактора, методы обнаружения вибрации элементов реакторного оборудования, методы анализа вибросуммовой информации, отечественные и зарубежные системы вибросуммового контроля и диагностики ВВЭР.

Представлен обширный экспериментальный материал по вибросуммовым сигналам ВВЭР-1000 и ВВЭР-440.

Для научных, инженерно-технических работников, студентов и аспирантов, связанным с проблемами проектирования, эксплуатации, контроля и диагностики реакторного оборудования.

Табл. 37. Ил. 163. Библиогр. 284 назв.

Научное издание

Виброшумовая диагностика ВВЭР

**Аркадов Геннадий Викторович
Павелко Владимир Ильич
Усатов Александр Иванович**

*Редакторы Л. В. Лещинская, Е. А. Пухлякова
Компьютерная верстка В. В. Демкин*

Готовлено к печати с оригинал-макета. Формат 60×88/16. Бумага офсетная № 1. Усл.-печ. л. 21,5. Уч.-изд. л. 21,52. Тираж 2000 экз. Заказ

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-14 Школьная наб., Спечпечать-интегрофин ООО «Галлея-Принт».

Предисловие

Вопросы повышения уровня безопасности и продления сроков эксплуатации действующих энергоблоков АЭС являются чрезвычайно актуальными в мировой ядерной энергетике и, в частности, в нашей стране. Первые отечественные АЭС с реакторами типа ВВЭР-440 перешагнули возрастной рубеж в 30 лет, и назначенный срок эксплуатации продлен еще на 15 лет. Такая же работа проводится и на первых зарубежных АЭС.

Исследования экономической эффективности продления срока эксплуатации энергоблоков Нововоронежской и Кольской АЭС показали финансовую выгоду данного инвестиционного проекта. Удельные затраты на модернизацию и другие мероприятия, связанные с продлением срока эксплуатации, ниже затрат на строительство в 5–6 раз.

Для решения указанных вопросов чрезвычайно важны разработки диагностических систем, среди которых особое значение имеют системы, основанные на виброшумных методах.

Представленные в данной книге системы виброшумовой диагностики (СВШД) являются, прежде всего, компьютерными системами. Они не могли быть предусмотрены проектом реакторной установки тридцатилетней давности. Слишком слабыми были тогда компьютеры, да и сами методы виброшумовой диагностики находились в зачаточном состоянии. Теперь, анализируя этот тридцатилетний период, понятно, что сколько-нибудь жизнеспособный симбиоз из консервативного энергетического оборудования и быстро развивающихся компьютерных средств и информационных технологий под названием СВШД был в то время весьма проблематичным. Получается, что первые промышленные отечественные СВШД завоевали себе право на жизнь, когда первые отечественные АЭС уже отработали значительную часть назначенного проектного срока. Но и в этом случае СВШД очень актуаль-

ныс значительно расширяя наблюдаемость объекта диагностики, СВЦД дает текущую информацию о вибрационном ресурсе оборудования с продленным сроком эксплуатации

Для вводимых в эксплуатацию новых блоков АЭС с реакторами типа ВВЭР СВЦД наряду с другими системами раннего диагностирования уже введена в проект реакторной установки. По существу, это предопределяет новую культуру ее технического обслуживания, так как вводится новый значительный информационный ресурс обеспечения безопасной эксплуатации АЭС

Книга является первым российским опытом систематического изложения методов вибрационной диагностики как общего назначения, инвариантного к типу реактора, так и ориентированных только на отечественные реакторы типа ВВЭР. В этой связи она будет полезна широкому кругу заинтересованных лиц, начиная от студентов и преподавателей вузов и заканчивая разработчиками и пользователями систем ранней диагностики реакторов.

Предлагаемой книгой группа специалистов по диагностике реакторных установок открывает новую серию научной и учебной литературы — «Оперативная диагностика ВВЭР». В ближайшие годы планируется издание книг по методам и алгоритмам, реализованным в следующих программно-технических комплексах раннего диагностирования:

- системах обнаружения протечек теплоносителя по разным физическим полям (влажности, радиоактивности, акустической эмиссии);

- системах оценивания остаточного ресурса оборудования по штатным и нештатным сигналам;

- системах контроля перемещения оборудования при изменении температуры теплоносителя;

- системах обнаружения освободившихся и слабоакрепленных предметов;

- системах диагностирования роторного оборудования

- системах диагностирования арматуры

Член корреспондент РАН

А. А. Айбаев

Предисловие авторов

Современные концепции безопасной эксплуатации атомных станций базируются на широком внедрении систем ранней диагностики. Комплекс таких систем, объединенных единой информационной оперативного диагностирования, взаимодействующий с системами контроля и управления реакторной установкой (РУ), позволяет обеспечить и полноту, и глубину диагностирования, отвечающие современным требованиям безопасной эксплуатации АЭС.

Виброшумовая диагностика РУ занимается определением вибросостояния внутрикорпусных устройств (ВКУ), теплообменивающих оборот (ТВО), корпуса реактора и основного оборудования главного циркуляционного контура (ГЦК) по совокупному анализу сигналов различных датчиков вибраций и флуктуирующих составляющих реакторных сигналов в эксплуатационных условиях.

Вибрации всегда представляют собой угрозу безопасной эксплуатации АЭС. В США в 70-е годы в период бурного развития ядерной энергетики доля аварийных остановов блоков АЭС, обусловленных аномальными вибрациями оборудования, достигала 10%.

В дальнейшем во всем мире фирмы-производители оборудования АЭС стали уделять проблемам вибраций особое внимание как на стадии проектирования и стендовой отработки элементов оборудования, так и в период пусконаладочных работ, а затем и в период нормальной эксплуатации блоков. Начали интенсивно развиваться методы и средства контроля вибраций. В настоящее время компьютерные системы вибрационного контроля являются атрибутом технического обслуживания оборудования АЭС.

Виброшумовая диагностика реализуется наукоемкими программно-техническими комплексами. В зависимости от осуществляемых функций это — либо системы виброшумового контроля (СВШК), либо системы виброшумовой диагностики. Их сущест-

янным различие состоит в том, что СВШД ставят диагнозы автоматически, а СВШК только выдает пользователю некоторую совокупность числовых и функциональных статистических оценок полученных из измеренных сигналов.

Авторы не ставят задачу представить сколько-нибудь полный обзор обширных материалов международных конференций по реакторным шумам. Основное внимание уделено работам, ставшим классическими, современным публикациям по виброшумовой диагностике ТВС и ВКУ в эксплуатационных условиях, а также опыту, приобретенному авторами при интерпретации обширного экспериментального материала по реакторным установкам с ВВЭР 440 и ВВЭР-1000.

Книга содержит большое число иллюстраций. Конечно, большие объемы информации, выдаваемые многоканальными СВШД, — специфика этих систем, обслуживающих такие сложные объекты, как РУ. Авторы стремились предоставить как можно больше экспериментальных данных, имеющих устойчивый характер для данного типа РУ, с тем, чтобы настоящие и будущие пользователи СВШД могли обратиться к ним как к эталонам нормального виброшумового состояния.

Большую роль в становлении отечественной виброшумовой диагностики РУ ВВЭР сыграли специалисты ведущих организаций Министерства России:

РНИ «Курчатовский Институт»: В.В. Булавин, А.С. Кужиль, Г.Л. Лукин, В.И. Митин, А.И. Мочалов, А.Е. Савушкин, В.Б. Черненко;

ФГУДП ВНИИАЭС: Г.Г. Анкин, А.В. Белослазов, С.В. Илютов, А.Н. Калинин, Б.К. Кудрявцев, В.П. Матвеев, О.В. Овчаров, С.Л. Перов, Б.М. Финюэль;

ГНИ РФ ФЭИ: С.Н. Костун, С.А. Морозов, А.О. Скобиров, Д.М. Швецов, В.С. Федотовский;

ФГУП «Атомэнергоспроект»: А.Б. Малышев, Н.А. Исаев,

ФГУП ОКБ «Гидропресс»: Ю.А. Анисеев, А.В. Воронков, В.А. Даленов, Ю.Г. Драгунов, Н.П. Коноплев, А.О. Плюш, С.Б. Рыков;

НИИ СНИИП: С.В. Дробышев, В.Б. Суховерко, С.Б. Чебышев, Корпорация «ТВЭЛ»: В.Л. Молчанов, В.В. Новиков;

Концерн «Росэнергоатом»: В.В. Голованов, Д.Ф. Гудев, И.Н. Да

и энки, А.М. Кирикнико, Ю.В. Копыев, С.П. Крылов, В.Н. Лозачев, С.Е. Матюков, С.А. Немытов, В.Е. Хлебачев, А.Н. Шкаровский.

Наукоёмкость методик оперативной диагностики ВВЭР, а также необходимость разработки конкурентоспособных систем для АЭС России обусловили создание специализированного предприятия «Дианпром», основным направлением деятельности которого является разработка, поставка и сопровождение эксплуатации систем оперативной диагностики ВВЭР – включая систему виброшумовой диагностики РУ ВВЭР.

Развитие виброшумовой диагностики потребовало не только научных исследований и проектных проработок, но и экспериментальных работ, выполняемых непосредственно на АЭС с ВВЭР. Авторы считают своей приятной обязанностью поблагодарить высококлассных специалистов российских АЭС, внесших наибольший вклад в развитие этого очень непростого направления реакторной инженерии: М.Л. Кожина, Ю.Н. Пыткина, С.И. Титова, В.Р. Резнича – Кольская АЭС; В.С. Балашова, В.Я. Грубмана, П.А. Кинтора, Т.Ю. Нелак, Л.А. Соколова – Калининская АЭС; Н.Ф. Дехало, С.М. Иванова, В.Ф. Кольжнова, О.М. Мухомыкова – Балаковская АЭС; С.П. Козыренко, А.М. Шифрина, М.Т. Слепова – Нововоронежская АЭС.

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук С.В. Жидкову за предложения и критические замечания, способствующие улучшению книги.

Список принятых сокращений

АкЗ	активная зона
АКНП	— аппаратура контроля нейтронов и теплов
АКФ	— автокорреляционная функция
АР	— авторегрессионный
АРК	аварийная регулирующая кассета
АСВ	— акустическая стоячая волна
АСТМ	— автоспектральная плотность мощности
АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика
АЭС	— атомная электрическая станция
БВД	— бегущая волна давления
БД	база данных
БЗТ	— блок защитных труб
БПФ	быстрое преобразование Фурье
БШУ	— блочный шит управления
ВКУ	внутрикорпусные устройства
ВКФ	взаимная корреляционная функция
ВРК	внутриреакторный контроль
ВСПМ	— взаимная спектральная плотность мощности
ВЧ	— высокая частота, высокочастотный
ГВУ	главное вычислительное устройство
ГШК	главный циркуляционный контур
ГЦН	главный циркуляционный насос
ДАП	— датчик абсолютных перемещений
ДК	диагностическая кассета
ДОП	— датчик относительных перемещений
ДПД	— датчик пульсаций давления
ДПЗ	детектор прямого излучения
ДР	дистанционирование решетчат
ИК	ионизирующая камера
НШ	нейтронный шум
НЧ	низкая частота, низкочастотный
КГО	контроль герметичности оболочек
КС	— коэффициент гидравлического сопротивления

КД	конденсатор давления
КНН	канал нейтронах измерений
МАР	многомарный авторегрессионный
МНК	метод наименьших квадратов
НК	направляющий канал
ПГ	парогенератор
ПНИ	предварительные испытания
ПО	программное обеспечение
ППР	планово-предупредительный ремонт
ПТК	— программно-технический комплекс
РК	— рабочая кассета
РУ	реакторная установка
СВРК	система внутриреакторного контроля
СВШД	система виброшумовой диагностики
СВШК	система виброшумового контроля
СКЗ	среднее квадратическое значение
СО	спектральный образ
СОСП	— система обнаружения слабозакрепленных предметов
СП	— случайный процесс
СУЭ	система управления и защиты
ТВС	тепловыделяющая сборка
ТВСА	тепловыделяющая сборка альтернативная
ТКР	температурный коэффициент реактивности
ТН	— теплоноситель
ТП	термопара
УТВС	усовершенствованная тепловыделяющая сборка
ХГО	— колонная-горячая обмотка
ЭО	— элементарная операция
BWR (Boiling Water Reactor)	— реактор с кипением воды
IMORN (Informal Meeting on Reactor Noise)	— неформальные встречи и семинары по реакторно-шумовой диагностике
LPMS (Loose Parts Monitoring System)	— СОСП
PWR (Pressurized Water Reactor)	— реактор с водой под давлением
SMORN (Specialists Meeting on Reactor Noise)	— конференция специалистов по реакторной шумо-
SUS	система вибромониторинга
TDE (Time Delay Estimation)	— оценка времени запаздывания

Виброшумовая диагностика в комплексе задач раннего диагностирования

1.1 Историческая справка

Первые промышленные СВШК были поставлены на советские АЭС с РУ типа ВВЭР из-за рубежа несмотря на то, что на первых этапах исследования реакторных шумов ученые СССР занимали одно из лидирующих положений в мире. В 60-е годы были получены основные результаты по нейтронным шумам подкритических реакторов. Оказалось, что по специально построенным статистикам отсчетов дискретного сигнала нейтронного датчика можно получить кинетические параметры активных зон. Была разработана теория нейтронного шума подкритического реактора, в основу которой легло выведенное исследователями реакторных шумов распределение Пала—Бабаля—Могильнера.

Эти достижения использовались на стадии экспериментальной отработки активных зон на критических сборках. В конце 60-х — начале 70-х годов такие исследования интенсивно проводились в Физико-энергетическом институте (г. Обнинск) под руководством А.И. Могильнера и в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова под руководством В.В. Булавина. В те годы в ФЭИ стажировался молодой венгерский исследователь Г. Кошай, который впоследствии стал одним из авторов феноменологической теории нейтронного шума энергетического реактора с кипящим теплоносителем, во многом определивший развитие методов виброшумовой диагностики.

Практическую значимость шумового анализа энергетического реактора американский исследователь Тай оценил еще в 1963 г. [1]. После подведения итогов деятельности по шумовому анализу подкритических разнотопящих сред другой американский исследователь Урриг в своей монографии [2] отметил большие перспективы виброшумовой диагностики энергетического реактора.

С этого времени за рубежом начали проводить интенсивные исследования шумов энергетических реакторов для разработки новых способов диагностирования элементов РУ.

С 1977 г. виброшумовая диагностика энергетических реакторов различных типов становится одной из основных тем на международной конференции SMORN — конференции специалистов по реакторным шумам [3—9]. Всего таких конференций было восемь. В период между конференциями SMORN уже 25 раз проводились так называемые неформальные ежегодные семинары по реакторно-шумовой диагностике IMORN. По материалам этих конференций можно проследить развитие теоретической, а затем и методической базы виброшумовой диагностики, которая впоследствии нашла свое техническое воплощение в СВШК и СВШД.

В СССР также были достижения в виброшумовом анализе в том числе и опережающие свое время. Например, на первых блоках ВВЭР на НВАЭС проводился виброшумовый мониторинг, базирующийся на датчиках, которые не были демонтированы после проведения пусконаладочных испытаний штатных датчиках давления и ионизационных камерах [10]. На расчетном уровне успешно решались задачи по описанию вибраций трубопроводов РУ [11]. Начал выходить многотомный справочник «Вибрации в технике», в создании которого участвовали представители различных советских школ исследователей вибраций [12]. Наконец Генеральный конструктор ВВЭР (ОКБ «Гидропресс») совместно с Институтом машиноведения им. А.А. Благовозова разворачивает обширные исследования вибрационной прочности элементов РУ [13—15] в соответствии со следующей концепцией. Достаточный виброресурс элементов РУ типа ВВЭР закладывается проектными решениями, подтверждается стендовым моделированием, обеспечивается входным контролем вибросостояния на стадии ПНИ методом сравнения с головным блоком, далее предполагается эксплуатация блока в соответствии с проектными ограничениями, а в случае какой-либо деградации элементов РУ виброресурс поддерживается планово-предупредительными ремонтами. Современные концепции обеспечения виброресурса РУ имеют еще один этап: виброшумовая диагностика в процессе нормальной эксплуатации между двумя последовательными ПНР.

Следует отметить, что в СССР исследования были посвящены главным образом, вибрационным работам, а шумовые исследования не укладывались в существующую тогда концепцию обеспечения виброресурса. Даже в единственном книжном издании [16] посвященном вибрациям элементов оборудования ЯЭУ, нет ни слова о виброшумовых методах их контроля. А это был 1989 г. когда ведущие зарубежные фирмы (Siemens, Westinghouse, Framatome) уже разработали и создали первые промышленные СВШК.

Участие советских исследователей реакторных шумов на конференциях SMORN было крайне непредставительным, но в то же время в рамках Совета Экономической Взаимопомощи осуществлялся беспрецедентный проект экспериментального исследования шумов кипения ТН РУ типа ВВЭР. Была разработана и построена специальная диагностическая кассета (ДК) с большим числом датчиков и возможностью регулировать расход ТН через нее в результате чего в ДК осуществлялись всевозможные стадии кипения ТН [17]. ДК была установлена на АЭС Райнсберг, и в нескольких сериях экспериментов получены уникальные результаты, положившие начало разработке феноменологии шумов реакторов с водой под давлением. В этом направлении особых успехов добились венгерские и немецкие исследователи. После аварии на Чернобыльской АЭС данный проект был прекращен.

В СССР натурные виброшумовые исследования проводились Институтом атомной энергии им. И.В. Курчатова (группы В.В. Булавина, А.С. Кужия, В.И. Митина, А.Е. Сапушкина) и Физико-энергетическим институтом (группа С.А. Морозова) на различных АЭС с РУ ВВЭР. Эти работы явно запаздывали, а с учетом технологического отставания СССР в электронике и экономического спада начала 90-х годов экспериментальные отечественные СВШК, конечно, не могли конкурировать с зарубежными промышленными СВШК.

Предстояло выбрать подходящие зарубежные СВШК, чтобы начать их внедрение на отечественные блоки АЭС. В начале 90-х годов фирма Siemens стала поставлять СВШК на РУ с ВВЭР-440 и на энергоблоке I Калининской АЭС с ВВЭР-1000 внедрялись СВШК CARD разработки венгерского Института физических исследований. Работы по внедрению и адаптации СВШК фирм

Siemens на четырех блоках с РУ ВВЭР-440 возглавил ВНИИАЭС (группа Д.Ф. Гуцера). Предполагалось, что после внедрения голландных образцов зарубежных СВШК на отечественные АЭС будут разработаны и созданы советские аналоги этих систем.

В настоящее время можно констатировать, что опыт эксплуатации перечисленных выше зарубежных СВШК на отечественных АЭС в течение 10 лет был очень полезен, но по разным причинам сами СВШК не стали штатными системами технического обслуживания АЭС. С помощью этих ПТК был развит собственный потенциал, позволивший разработать и создать отечественные СВШД, не уступающие лучшим современным зарубежным аналогам. Эти работы проводились во ВНИИАЭС (группа Б.М. Финкеля) и в специально созданном предприятии «Диапром» (директор Д.Ф. Гуцер, а затем А.И. Усанов).

В настоящее время СВШД вошли в проекты строящихся АЭС с РУ типа ВВЭР, разработке методов и средств виброшумовой диагностики уделяется большое внимание. Примечательно, что на научно-технических конференциях концерна «Росэнергоатом» [18, 19], Генерального конструктора ВВЭР [20, 21], ОАО «ТВЭЛ» [22, 23] было представлено по несколько докладов на темы виброшумовой диагностики. Таким образом, организации, определяющие безопасную эксплуатацию АЭС — Генеральный конструктор РУ, изготовитель топлива для АЭС и эксплуатирующая АЭС организация, — высоко оценивают важность этих работ.

Несмотря на широкое распространение компьютерных систем виброконтроля официальная информация о виброотказах по-прежнему остается крайне скудной. Еще в 1994 г. МАГАТЭ за планировала создание общедоступной международной базы данных о таких инцидентах [24], но до сих пор эта идея не реализована. Эксплуатирующие АЭС организации, как за рубежом, так и в России, из конкурентных соображений не торопятся наполнить эту базу данных. В то же время информация об отказах накапливается в национальных и ведомственных БД с ограниченным кругом пользователей. В последнее время информацию из этих БД в дозированной виде начали предавать гласности на научно-технических семинарах как иллюстрацию достижений современных средств и методов диагностирования. Число таких семинаров резко возросло [25—38].

1.2. Задачи систем раннего диагностирования реакторной установки

В качестве исходного события аварийной ситуации, как правило, выбирают очень тяжелый инцидент: например, гильотинный разрыв трубопровода первого контура или всевозможные отказы основных элементов оборудования, сопровождаемые грубыми ошибками эксплуатационного персонала и т.д. Однако исходным событием аварий предшествует цепочка более мелких событий (рис. 1.1), которые, как правило, либо не фиксируются существующими штатными каналами измерения либо не ищутся из-за «малых» аномалий штатных сигналов.

Именно мелкие события определяют частоту «малых» инцидентов на АЭС, которые по международной семибалльной шкале аварий оцениваются не выше, чем в три балла. Таким образом, РУ может быть защищена от тяжелых аварий, вероятность которых практически сведена к нулю и в то же время иметь высокую частоту «малых» инцидентов. Помимо того, что мелкие дефекты по мере их накопления могут перерасти в крупные инциденты, по их частоте общественное мнение судит о безопасности той или иной АЭС.

Какой совершенной ни была бы РУ, ее элементы оборудования не являются абсолютно надежными, а решения, принимаемые эксплуатационным персоналом, — абсолютно безошибочными. Таким образом, любая РУ, являясь сложным техническим объектом, всегда будет эксплуатироваться с «малыми» инцидентами. Поэтому в процессе эксплуатации важно уметь выявлять такие события, которые при своем развитии могут поднимать на ее работоспособность. Эту информационную «нишу» и должны заполнять системы раннего диагностирования.



Рис. 1.1. Схема развития дефекта и исходное событие аварии

Четыре важнейших свойства шумовой диагностики выдвинули разработчики систем шумовой диагностики в разряд перспективных систем обеспечения безопасной эксплуатации АЭС:

- пассивность;
- высокая чувствительность к аномалиям;
- возможность работы в эксплуатационных условиях;
- единственность по отношению к некоторым типам неисправностей

Решение конкретных диагностических задач нашло свое техническое воплощение в так называемых локальных системах диагностики. Принцип локальности состоит в том, что конкретная система либо диагностирует некую часть объекта (например, только ГЦН), либо фиксирует определенный физический процесс (например, выявляет течь теплоносителя). Каждая из них, представляя собой функционально завершенную систему, очевидно не претендует на полноту диагностирования РУ. Однако комплекс таких систем, увязанный единой идеологией оперативного диагностирования РУ, взаимодействующий с системами контроля и управления РУ способен обеспечить и полноту, и глубину диагностирования, отвечающую современным требованиям безопасной эксплуатации АЭС. Такой подход интегрирования (снизу вверх) локальных систем в единую комплексную систему оперативной диагностики использует большинство фирм-разработчиков диагностического оборудования АЭС. Однако среди них нет единства мнений о достаточной полноте того или иного множества локальных систем диагностирования. Для РУ типа ВВЭР применяют следующие локальные системы:

- систему виброшумовой диагностики;
- систему обнаружения протечек теплоносителя по разным физическим полям (влажности, радиоактивности, акустическому эмиссии);
- систему оценивания остаточного ресурса оборудования по штатным и нештатным сигналам;
- систему контроля перемещения оборудования при изменении температуры теплоносителя;
- систему обнаружения ослабевших и слабоукрепленных резьбов
- систему диагностирования роторного оборудования

систему диагностирования ПИН;
систему диагностирования арматуры,
систему диагностирования приводов СУЗ.

Локальные системы диагностики РУ приобретают статус штатных систем эксплуатации АЭС. Эти системы в обязательном порядке закладываются в проекты новых блоков АЭС а блоки находящиеся в эксплуатации, дооснащаются ими. Но прежде чем локальные системы диагностики будут действительно вносить существенный вклад в достижение безопасной эксплуатации АЭС и давать положительный экономический эффект, предстоит решить множество задач, начиная от поиска оптимального детекторного оснащения и заканчивая совершенствованием способов достижения того или иного диагноза.

Особенно остро эти проблемы стоят для систем вибродиагностики. Сложность интерпретации спектральных виброхарактеристик, требующая экспертной поддержки в принятии решения, высокие требования к квалификации обслуживающего персонала из-за наукоемкости самих систем, неопределенность конечных целей вибромониторинга из-за скудности априорных знаний о вибросвойствах РУ и, как следствие, отсутствия нормативной базы затрудняют присвоение этим системам статуса штатных систем диагностики РУ.

Для реализации раннего диагностирования необходимы работы в двух направлениях. Во-первых, увеличение наблюдаемости объекта за счет наращивания штатных измерений новыми, высокочувствительными к «малым» аномалиям измерительными каналами. Во-вторых, разработка методов выделения диагностической информации из штатных и нештатных сигналов. Большинство из этих методов длительное время были только инструментом исследований, например, методы шумового анализа или методы полномасштабного вибромоделирования РУ. Чтобы довести их до эксплуатационного уровня, необходим длительный этап приработки систем ранней диагностики к конкретной РУ, начинающийся с лабораторного моделирования, с прохождением этапов экспериментирования на стендах и объектах, этапов опытной эксплуатации и т.п.

Любая спектральная оценка любого сигнала первичного преобразователя системы виброконтроля содержит до нескольких дц.

ситков резонансных особенностей, а каждая резонансная особенность вообще говоря, несет информацию о техническом состоянии того или иного элемента РУ. Если резонанс описывается местоположением на оси частот амплитудой и добротностью, то по каждому такому параметру в идеале, необходимо иметь диагностические пороги и алгоритмы, связывающие выходы за пороги с диагностическими сообщениями. Большинство существующих СВШК способны лишь следить за изменениями некоторых спектральных диагностических признаков в эксплуатационных условиях, но не автоматически устанавливать диагнозы.

Главная задача СВШД — определение вибросостояния оборудования по медленно изменяющимся как за межремонтный период так и за время жизни РУ параметрам (по трендам, которые изменяются с достаточно большим временным шагом). В подобных диагностических задачах всегда существуют затруднения при выставлении порогов по диагностическим признакам. Из-за априорной неопределенности их, как правило, назначают после наблюдения за объектом в течение достаточно длительного времени.

Наиболее сложен виброконтроль ВКУ и ТВС, причем, что именно для них вибрации наиболее опасны, так как вибрационное повреждение угрожает выходу радиоактивности за пределы барьеров безопасности. Основное оборудование ЦК диагностировать легче вследствие того, что датчики вибрации могут быть смонтированы непосредственно на нем. По результатам многочисленных экспериментальных обследований, проведенных в различных странах, вибрации до сих пор являются одной из основных причин отказов ТВС. В эксплуатационных условиях крайне затруднительно не нанося ущерба надежности оборудования в целом, контролировать вибрации непосредственно, т.е. устанавливая датчики вибраций на ВКУ и ТВС, хотя такие прецеденты и существуют [39, 40].

В конечном итоге системы виброшумового контроля реакторной установки базируются на косвенных измерениях и, в частности, на измерениях флуктуирующих компонентов сигналов штатных детекторов. Так, большинство СВШК используют совокупность датчиков перемещений, установленных на корпусе реактора, датчиков пульсаций давления (ДПД) теплоносителя и датчиков вне- и внутризонного нейтронного потока. При этом чувствительность к амплитудам вибраций ВКУ и ТВС может достигать

единиц микрометров, а частотный диапазон (десятые доли герц — десятки герц) покрывает первые основные типы колебаний ВКУ и ТВС. Тем не менее вопрос о достаточности глубины анализа тирования такими средствами нельзя считать закрытым.

Вибронизнос ТВС зависит не только от ее собственных вибрационных свойств (собственные частоты, собственные типы колебаний ТВС), но и от вибросостояния ВКУ (особенно шахты), корпуса реактора, вертикального прижимного усилия со стороны БЗТ, локального расхода теплоносителя через данную ТВС, перепада давления ТН на АКЗ и параметров пульсаций давления ТН.

Один из главных факторов вибронегруженности ВКУ и ТВС — скорость (расход) ТН. Причем важны как интегральный расход по контуру, так и локальные поканальные расходы. Если виброизнос или непроектное закрепление ВКУ и ТВС чаще всего выявляются по изменению частоты резонанса соответствующего элемента, то увеличение расхода сверх проектной нормы чаще всего проявляется в увеличении амплитуды виброперемещений.

ВКУ и ТВС как элементы единой конструкции связанных колебательных масс влияют на вибросостояние друг друга. Тем не менее в качестве грубого приближения можно считать, что расход ТН по контуру как интегральный параметр определяет вибронегруженность шахты, а поканальные расходы — вибронегруженность ТВС.

ТВС может иметь превосходные собственные вибрационные свойства, но если она является частью аномально вибрирующей конструкции (по перечисленным выше параметрам), то ее виброресурс может быть исчерпан до окончания назначенного срока эксплуатации. Поэтому контроль вибраций ТВС в эксплуатационных условиях нельзя проводить в отрыве от контроля вибраций ВКУ и корпуса, а также шумовых измерений расхода и пульсаций давления. Перечисленные проблемы являются составной частью реакторно-шумовой диагностики, а по объему расчетно-экспериментальных исследований и важности их приложений — основной частью этой области диагностики. Строго говоря, на вибрации ТВС влияют не только вибрации ВКУ и корпуса реактора, но и вибрации оборудования петель и, особенно, ГЦН. Поэтому число измерительных каналов СВШК расширяют за счет каналов измерения виброперемещений основного оборудования и трубопроводов ГЦК.

Полным решением обширных задач виброконтроля основного оборудования ГЦК ВКУ и ТВС СВЩД может быть использована для:

измерения температурного и барометрического коэффициентов реактивности и как следствие определения концентрации борной кислоты в теплоносителе;

обнаружения и контроля недогретого кипения ТН

измерения поканального расхода ТН,

идентификации параметров различных передаточных функции активной зоны, характеризующих ее теплогидравлическое состояние

самодиагностирования датчиков внутриреакторного контроля, в том числе, измерения эффективности ДПЗ ИК и постоянных времени термопар.

1.3 Инциденты обусловленные аномально вибрирующими ВКУ и ТВС

Локальные системы диагностирования, реализующие принцип раннего распознавания отказов оборудования, поставляют эксплуатационному персоналу как редкое событие так называемое диагностическое событие — акт пересечения заранее назначенного диагностического порога некоторым диагностическим признаком. При корректно настроенных порогах локальная система диагностирования чувствительна к самым ранним стадиям зарождения аномалии. События, приведенные в табл. 1.1, к таковым отнести нельзя. Это не результаты ранней диагностики, так как в те времена локальные системы диагностики либо отсутствовали либо находились в зачаточном состоянии.

В некоторых случаях аномальные вибрации обнаруживали по нештатным сигналам датчиков вибраций, которые не были де-монтированы со времен пусконаладочных испытаний. Но чаще всего использовали показания штатных датчиков (нейтронного потока и давления), которые непосредственно не предназначались для измерения вибраций. Так, аномальные вибрации теплового экрана на АЭС Big Rock Point (США) в 1964 г. были обнаружены, когда размах колебаний нейтронного потока в номинальных условиях эксплуатации достиг 9% [16]. Обычно размах флуктуаций нейтронного потока для большинства конструкций реакто-

Таблица 1 Инциденты, обусловленные аномалиями информации ВКУ и ТВС
(с 1967 по 1985 гг.) [44–48]

Год	Тип, станция, страна	Аномально-информирующий элемент	Аномальные сигналы датчиков	Принятые меры
1967	PWR, Obrighton ФРГ	Теплообменный экран	Датчики вибрации на корпусе реактора	Неплановый ремонт критических элементов жарыя, доработочные критические элементы
1969	BWR, HBAЭС СССР	Теплообменный экран	Датчики давления	Неплановый ремонт, изменение конструкции
1972	PWR, Palmdes США	Щита, теплообменный экран	НК, ДПЗ, акселерометры	Неплановый ремонт критических элементов, изменение конструкции
1973	PWR, Seale ФРГ	Опорная конструкция АкЗ	Датчики давления	Изменение конструкции
1973	BWR, Greifswald ГДР	АРК	Вибрация с НК	То же
1975	PWR, Biblis ФРГ	Щита	Датчики вибраций, вращений НК	Замена разрушенных критических элементов
1980	PWR, Thango 1, Бельгия	ТВС	НК, ДПЗ, акселерометры	Замена разрушенных ТВС
1981	PWR, Oconee, США	Теплообменный экран	НК	Неплановый ремонт, изменение конструкции
1981	PWR, Bugey 3 Франция	ТВС	ДПЗ	Замена разрушенных ТВС
1981	PWR, Biblis, ФРГ	Опорная конструкция АкЗ	Акселерометры	Изменение конструкции
1982	PWR, BfMg, ФРГ	ТВС	ДПЗ	Замена разрушенных ТВС
1981	PWR, Sahal, Франция	Щита	Акселерометры	Неплановый ремонт, изменение конструкции

Год	Тип станция страна	Аномальный вибрационный элемент	Аномальный с сигналы датчиков	Принятые меры
1983	PWR, Main Yankee США	Теплообмен- ный экран	НК	Неплановый длитель- ный ремонт, изменение конструкции
1983	PWR, Trojan США	ТВС шахты	ДПЗ	Неплановый для сты- ный ремонт
1984	PWR, Wolsk, ФРГ	Шахта	Датчики вибра- ции	Нормос из конструк- ции
1985	ВВЭР, Greifswald, ГДР	Шахта	НК	Неплановый длитель- ный ремонт

ров редко превосходит 0,5% среднего уровня тока нейтронного детектора. На реакторе EBR-2 (США) аномальные вибрации ТВС вызвали увеличение колебаний нейтронного потока до 2,5%. На АЭС Greifswald (ГДР) с ВВЭР-440 в 1985 г. из-за потери жесткости упругими трубчатыми элементами крепления шахты среднее квадратическое значение (СКЗ) флуктуаций нейтронного потока увеличилось на порядок [41, 42].

Инцидент, зафиксированный под первым номером (см. табл. 1.1), был обнаружен во время ПНИ. Тем самым была предотвращена крупная авария, так как износ узлов крепления теплового экрана был столь значительным, что они непременно бы разрушились в течение первой же кампании.

В 1973 г. на АЭС Stade (см. табл. 1.1) по повышенным пульсам давления ТН на высоких частотах было обнаружено ослабление крепления днища шахты. Тот факт, что в эксплуатационных условиях возможно обнаружение слабо затянутого болта элемента ВКУ (как потом выяснилось при проведении ППР) по флуктуирующим сигналам штатных датчиков, послужил толчком для развития СВШК. В настоящее время вибрации этих элементов конструкции, расположенных на днище корпуса реактора, контролируются на значительном удалении с помощью датчиков перемещения, установленных на крышке корпуса реактора.

Ключевым событием в истории вибрационных инцидентов считается инцидент, связанный с аномальными вибрациями шахты на АЭС Palisades (США) в 1972 г. Исследовательская группа под руководством Р. Крайтера успела провести качественные измерения флуктуаций сигналов детекторов вне- и интрузионного нейтронного потока в период до выхода блока в ППР. Работа [43], в которой были представлены основные диагностические признаки аномальных вибраций шахты в виде различных авто- и взаимных вероятностных характеристик НШ, стала классической. Заключение исследовательской группы об аномальном виброустояновлении шахты совпало с последующими выводами инспекции во время проведения ремонтных работ. С этого времени нейтронно-шумовой метод контроля ВКУ стал интенсивно внедряться на АЭС различных стран.

1.4. Особые свойства системы виброшумовой диагностики

СВШД характеризуется существенными особенностями по сравнению с другими локальными системами диагностики. Ниже СВШД сравнивается с двумя распространенными системами: системой обнаружения и локализации посторонних предметов и слабо закрепленных частей (СОСП) и системой контроля (акустической) температуры теплоносителя (СКАТ).

СВШД базируется на датчиках различной физической природы и, как правило, имеет больше каналов измерения, чем СОСП и СКАТ. Спектральные характеристики сигналов СВШД представляют большее число диагностических признаков, чем сигналы СОСП и СКАТ. В отличие от СОСП и СКАТ СВШД имеет большой резерв по увеличению числа диагностических признаков. Перебрать все возможные пары сигналов, чтобы построить взаимные характеристики, практически невозможно: всего возможных пар сигналов $(n^2 - n)/2$, где n — число каналов. Например, для $n = 32$ число пар достигает 500. О комбинаторике каналов для многомерных спектральных характеристик говорить не приходится.

И СОСП, и СКАТ настраиваются на выявление какого-либо одного физического явления. В первом случае обнаруживаются удары по корпусу реактора, во втором — увеличение мощности акустического шума из-за выхода ТН за пределы ГЦК. Резонансы сигналов

СВШД, как правило, представляют собой сложный комплекс физических явлений. Например, в сигналах СВШД эффекты вибрации опосредуются нейтронно-теплогидравлическими явлениями.

Объем вычислений и их сложность для извлечения из регистрируемых сигналов диагностических признаков у СВШД несомненно выше, чем у систем СОСП и СКАТ. Вряд ли правомочно требовать знания этих вычислительных процедур от эксплуатирующего персонала АЭС. Например, многомерный авторегрессионный анализ (МАР-анализ) — эффективный инструмент получения вибродиагностических признаков — реализуется рекурсивной комплекснозначной матричной арифметикой, освоение которой требует высокой математической культуры.

СОСП и СКАТ в главных своих функциях представляют собой прежде всего системы обнаружения (есть или нет течь, есть или нет в ГЦК посторонние предметы) и только потом системы, производящие некие оценки (где и какая течь, где и какой массы посторонний предмет). Вибрации же на функционирующем оборудовании существуют всегда. Конечно, можно считать, что и СВШД является системой обнаружения только аномальных вибраций. Однако не всегда удается определить, что есть аномальная вибрация того или иного конструкционного элемента, который отображается сигналами СВШД. Не всегда возможно априори регламентировать нормативными документами пределы изменения вибрационных характеристик того или иного элемента в процессе эксплуатации. Именно наблюдение за ними в течение, по крайней мере, одного топливного цикла позволяет сформировать пороги по некоторым диагностическим признакам, выход за которые отождествляется с появлением аномального вибростояния.

Любая из перечисленных систем для своей эффективной работы требует априорных сведений. Однако объем и сложность априорных сведений для СВШД значительно выше, чем для других перечисленных систем. Иными словами, СОСП и СКАТ в известном смысле инвариантны к объекту диагностирования. Их алгоритмы диагностирования могут быть построены заранее, а учет специфики конкретного реактора лишь улучшает отношение сигнал/шум и/или уменьшает число ложных тревог. Для СВШД тип реактора, его конструктивные особенности играют определяющую роль именно в алгоритмах диагностирования. Из-за этого адап-

тация СВШД к объекту не есть единичный акт настройки, а длительный процесс опытной эксплуатации.

СОСП и СКАТ — системы реального времени, т.е. они перерабатывают информацию со скоростью, не меньшей скорости ее поступления. Существование аномальных вибраций — из-за которых необходимо выводить блок из эксплуатации, — крайне редкое явление. А их внезапное появление, для обнаружения которого необходим режим реального времени — еще более невероятное событие. Основная функция СВШД — периодический отсроченный контроль вибраций оборудования в течение кампании реактора, выявление и анализ «медленных» трендов вибродиагностических признаков. Именно знание динамики вибродиагностических признаков и позволяет оценивать и прогнозировать реальный вибросостояние оборудования, не допускать его внезапных отказов, знать к моменту начала планового ремонта «слабые» места оборудования, прежде всего подлежащие ремонту или замене, т.е. производить ППР по состоянию, а не только по регламенту.

Анализ вибродиагностической информации требует экспертной поддержки. Для этого необходимы специалисты по вибродиагностике, способные проинтерпретировать наблюдаемые явления. Таким образом, чтобы получить качественные диагностические признаки в СВШД нужны специальные знания спектральной теории случайных процессов, а чтобы сцентерпретировать их, нужны специальные знания теории реакторных шумов и реакторной вибродиагностики. Вряд ли возможно создать такие группы экспертов на каждой АЭС. Экспертная поддержка эффективно реализуется межрегиональным диагностическим центром, в котором накапливается информация со многих АЭС, поэтому существует возможность проводить анализ не только по времени, но и по ансамблю однотипных реакторов.

Средствами СВШД попутно могут быть решены и другие, не вибродиагностические задачи, так как некоторые сигналы СВШД (ДПЗ, ИК, ДПД) несут диагностическую информацию о нейтронно-теплогидравлическом состоянии АКЗ. С их помощью можно оценивать неизмеряемые непосредственно параметры (коэффициенты реактивности, концентрацию борной кислоты, теплогидравлические параметры АКЗ, например, локальные расходы и т.п.), а также производить контроль кипения ТН и ресурсных изменений АКЗ.

В пределах нормального вибросостояния РУ СВЩД имеет до 10 с изменяющимися во времени диагностическими признаками. Изменения виброхарактеристик за кампанию неизбежны вследствие естественного износа оборудования. Разным эффектам соответствует своя динамика резонансов. Возможно перекрытие одного резонанса другим, выход резонанса за исследуемый диапазон частот, два резонанса могут поменяться местами на частотной оси за время между измерениями и т.п.

Чтобы выбрать некоторое множество резонансов, необходимо из первых, интерпретировать их, т.е. получить знания о причинах их происхождения и, во-вторых, сделать множество резонансов представительным, т.е. несущим достаточно полную диагностическую информацию о наиболее важных узлах РУ с точки зрения ее безопасной эксплуатации.

Интерпретация резонансов — длительный исследовательский процесс, включающий не только натурные измерения, но и стендовые эксперименты и модельные расчеты. Для интерпретации резонансов требуется коллективный труд нескольких исследовательских групп. Яркий пример — история шумовых исследований на РУ ВВЭР-440. Практически во всех странах, где эксплуатируется (или эксплуатировался) ВВЭР-440 (СССР, Болгария, Венгрия, Германия, Чехословакия, Финляндия), такие исследования проводились, однако говорить об их завершении не приходится.

Представительность множества резонансов также является предметом исследований. Совершенно необходимо, что самые большие по амплитуде резонансы АСПМ несут самую ценную диагностическую информацию. То же самое относится и к самым высоким спектральным характеристикам, высококогерентными составляющими могут быть маскирующие вибрации эффекты.

Элементы того или иного множества резонансов могут не воспроизводиться от одного измерения к другому, однако поиск таких отличий и есть одна из функций диагностики. Алгоритмы СВЩД должны выделять такие эффекты автоматически. Преимущество автоматического выделения резонансов состоит и в том, что аномалии выявляются на ранней стадии, когда они еще не заметны визуально. При ручном выделении частот резонансов их большее число в одной спектральной характеристике и непостоянство во времени обуславливают опасность пропуска эффектов

Список литературы

1. **Tillie J.** Reactor noise. New York, 1963.
2. **Урсе Р.** Статистические методы в физике ядерных реакторов: Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Могильнера. М.: Атомиздат, 1974.
3. **Prog. Nucl. Energy.** 1977. Vol. 1. SMORN-II.
4. **Prog. Nucl. Energy.** 1982. Vol. 9. SMORN-III.
5. **Prog. Nucl. Energy.** 1985. Vol. 15. SMORN-IV.
6. **Prog. Nucl. Energy.** 1988. Vol. 21. SMORN-V.
7. **A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics.** May 19–24 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. SMORN-VI.
8. **A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics.** June 19–23 1995, Arignou, France. SMORN-VII.
9. **Prog. Nucl. Energy.** 2003. Vol. 43, N1-4, SMORN-VIII.
10. **Десятилетний опыт эксплуатации Нововоронежской АЭС.** Сентябрь 1974, Материалы научно-технической конференции. г. Нововоронеж.
11. **Смирнов Л.В., Овчинников В.Ф.** Колебания элементов конструкции ЯЭУ, вызванные потоком теплоносителя. Ч. 1 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Динамика ЯЭУ. 1975. Вып. 2(6). С. 3–22. Ч.2. Там же, 1976, вып. 1(9). С. 3–24.
12. **Вибрации в технике: Справочник.** Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978.
13. **Исследование колебаний кассет АРК.** Динамические деформации и энергетическое оборудование / В.В. Стекольников, В.А. Федоров, В.Н. Лашенко и др. М.: Машиностроение, 1978.
14. **Вибропрочность оборудования АЭС /** Н.А. Махутов, А.А. Русаков, А.Н. Усачев и др. // Проблемы машиностроения и автоматизация. 1988. Т. 22. С. 68–80.
15. **Махутов Н.А., Фролов К.В., Стекольников В.В.** Экспериментальные исследования деформаций и напряжений в ВВЭР. М.: Наука, 1990.
16. **Вибрации элементов оборудования ЯЭУ /** Е.Д. Федорович, Б.С. Фокин, А.Ф. Аксельрод, Е.Н. Гольдберг. М.: Энергоатомиздат, 1989.
17. **Отчет по исследованию с диагностической топливной кассетой ДК 1-2 на АЭС Райнберг.** ISS N 0178 2950 1983 T 1 2 Akademie der Wissenschaften der DDR.
18. **Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики.** Материалы 2-й международной научно-технической конференции 22–23 марта 2001, Москва. Концерн «Росэнергоатом».
19. **Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики.** Материалы 3-й международной научно-технической конференции 18–19 апреля 2002, Москва. Концерн «Росэнергоатом».
20. **Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР.** Сборник трудов 2-й Всероссийской научно-технической конференции 19–23 ноября 2001. Подольск:

21. Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Сборник трудов 3-й Всероссийской научно-технической конференции. 26—30 мая 2003, Подольск.
22. Эффективное топливоиспользование для энергетических реакторов на базе конструкций ТВС нового поколения. Материалы ежегодной научно-технической конференции ОАО «ТВЭЛ». 13—14 февраля 2002, Москва.
23. Опыт разработки и эксплуатации усовершенствованного ядерного топлива. Повышение надежности ТВС. Ежегодная научно-техническая конференция ОАО «ТВЭЛ». 27—28 февраля 2003, Москва.
24. *Advances in safety related diagnostics and early failure detection systems: Report of a technical committee meeting organized by the IAEA and held in Vienna*. IAEA-14-TC898, November 20—24, 1995.
25. Методы и технические средства диагностирования ЯЭУ. 25—30 сентября 1994, Обнинск. Отраслевой семинар Министерства РФ по атомной энергии.
26. *Monitoring and diagnosis systems to improve nuclear power plant reliability and safety*. Proc. of the specialists' meeting IAEA, 14—17 May 1996 Gloucester, UK.
27. *Specialists' meeting on in-core instrumentation and reactor core systems at INCORE-96*. Proceedings, 14—23 October 1996, Mito, Japan.
28. Неразрушающий контроль и диагностика. 3—7 июня 1999, Москва. Сборник трудов 15-й международной конференции.
29. Атомные электростанции на пороге 21 века. Сборник трудов международной конференции, 8—10 июня 2000, Электросталь.
30. *19-th meeting of working group for nuclear power plant modernization Regional Workshop IAEA* 15-19 December 2000, Plzen, Czech Republic.
31. 5-я международная конференция по проблемам колебаний. Материалы конференции (ISCOUR-2001) 23—27 мая 2001, ИМАШ РАН, Москва.
32. Ядерное топливо ВВЭР-440. Опыт и перспективы. 10—12 августа 2001, Электросталь. Российско-венгерско-финский семинар.
33. Современные методы и средства диагностики ЯЭУ. 2—5 октября 2001, Обнинск. Сборник докладов отраслевого семинара министерства РФ по атомной энергии.
34. *WWER fuel performance, modeling and experimental support*. Proc. of the 4-th International Conference, 1—5 October 2001, Albena, Bulgaria.
35. Диагностика конструкций гидроупругих систем. Семинар ИМАШ РАН 24 сентября 2002, Москва.
36. Современные методы эксплуатационного мониторинга и неразрушающего контроля на атомных станциях. Материалы семинара Framatome ANP, 22—23 ноября 2002, Москва.
37. *Operational monitoring of primary circuit components*. Regional Workshop IAEA, 28—31 января 2003, Удомля.

38. **Проблемы вибрационных и акустических динамических конструкций в гетерогенных средах.** Российская межотраслевая школа-семинар, 23—24 июня 2003, Обнинск.
39. **Vibration measurements in PWR Obrigheim by use of in-core accelerometers** / E. Laggard, J. Fiedler, J. Runkel, D. Statke, D. Stegmann, B. Lukas D. Sommer. *Prog. Nucl. Energy*. 1995. Vol. 29.
40. **In-core measurement of reactors internals vibrations by use of accelerometers and neutron detectors** / E. Laggard, J. Runkel, D. Stegmann, P. Heidemann // *Specialists' meeting on in-core instrumentation and reactor core assessment*. INCORE-96, 14—23 October, 1996, Mito, Japan.
41. **Use of noise diagnostics for WWR-440** / A. Grabner, G. Grunwald P. Liewers et al. // IKF Report, Rosendorf, Germany, 1998.
42. **Systematic analysis of noisy signals in the nuclear reactor noise diagnosis of abnormal core barrel motion** / P. Liewers, W. Schmitt, P. Schumann, F.-P. Weiss // *8th International IMEKO symposium on technical diagnostics*. September 23—25, 1992, Dresden.
43. **Fry N.D., Kryter R.C., Robinson J.C.** Analysis of neutron density oscillations resulting from core barrel motion of the Palizades nuclear power plant. Report ORNL-TM-4570, Oak Ridge, Tennessee, 1974.
44. **Kauze U.** Upgrade of a service and maintenance center for diagnostic systems. Report Siemens AG/KWU, № ZXN541, 1996.
45. **Albrecht R., Seifritz W.** The information in neutron fluctuations / *Nucl. Sci. and Engrg.* 1970. Vol. 41. P. 417—420.
46. **Thie J.A.** Reactor noise monitoring for malfunction // *Reactor Technology* 1971. Vol. 14, N 4. P. 354—365.
47. **Seifritz W., Stegmann D.** Reactor noise analysis / *Atomic Energy Rev* 1971. Vol. 9, N 1. P. 129—135.
48. **Trenty A.** Operational feedback on internal structure vibration in 54 French PWRs during 300 fuel cycles // *Prog. Nucl. Energy* 1995 Vol. 29 N 3/4 P. 347—356.

Виброшумовая диагностика, осуществляемая зарубежными программно-техническими комплексами

*** 1 Зарубежный опыт виброшумовой диагностики ТВС и ВКУ в эксплуатационных условиях**

Самым большим опытом виброшумовой диагностики, если его измерять в единицах реактор-год, обладают французские эксперты [1—4]. Французский концерн EDF эксплуатирующий 54 реактора типа PWR (34 блока мощностью 900 MWt и 20 блоков мощностью 1300 MWt), длительное время накапливает централизованную базу данных вибрационных образов нейтронных шумов и сигналов акселерометров всех реакторов [5—7]. В этой БД, имеющей статус национального проекта, содержится вибродиагностическая информация о 300 топливных циклах различных реакторов.

СВШК фирмы EDF, строго говоря, нельзя назвать локальной системой. Она имеет три уровня пользователей: блочный, станционный и национальный. По существу, СВШК — элемент корпоративной компьютерной сети EDF, интегрирующей локальные станционные компьютерные сети со своими системами диагностики. В нормальных условиях эксплуатации нижние уровни занимаются сбором вибродиагностической информации и передачей ее на высший уровень. Виброшумовые измерения выходящего нейтронного потока и сигналов акселерометров автоматизированы и приведены к единому стандарту для всех эксплуатируемых блоков АЭС. При наличии развивающихся вибрационных аварий решение о компенсирующих мероприятиях принимается верхним уровнем.

Значительная статистика по времени и по числу РУ дает возможность делать достоверные выводы об изменении вибросостояния ВКУ и ТВС. Эксперты EDF отмечают три наиболее важных чисто механических явления, влияющих на вибросостояние перемещаемых элементов РУ [6—8]:

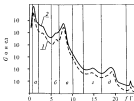


Рис. 2.1. АСПМ внешнего нейтронного шума реактора FWR мощностью 900 МВт (EDF, Франция) в начале (1) и в конце (2) топливного цикла [4];

а – 1-я мода вибраций ТВС; б – 2-я мода вибраций ТВС; в – 1-я мода вибрации шахты; г – вибрации корпуса реактора; д – оболочечная мода вибраций шахты

изменение жесткостей элементов, определяющих вертикальный прижим шахты;

изменение жесткостей пружинных блоков и дистанционирующих решеток ТВС;

износ поверхностей контакта шахты и корпуса реактора в нижних шпкнах.

На рис. 2.1 представлены две типичные автоспектральные плотности мощности внешнего нейтронного шума реактора FWR мощностью 900 МВт, соответствующие началу (нижняя кривая) и концу (верхняя кривая) топливного цикла.

На рис. 2.1 выделены поддиапазоны частот, в которых доминирует тот или иной нейтронно-шумовой эффект. Никаких вибрационных аномалий здесь не отмечается, а увеличение амплитуды АСПМ на всех частотах связано с процессом выгорания топлива (накоплением продуктов деления) и изменением концентрации борной кислоты за кампанию.

В 50% случаев изменение вибросостояния ВКУ и ТВС обусловлено релаксацией пружинных блоков и дистанционирующих решеток ТВС за кампанию (рис. 2.2). В свою очередь это уменьшает частоту вибраций ТВС и увеличивает их амплитуду, что приводит к изменению вибросостояния шахты (как балочных, так и оболочечных колебаний, причем последние изменяются значительно)

Аналогичные изменения вибросостояния шахты (уменьшение частоты и увеличение амплитуды) наблюдаются на самых старых реакторах мощностью 900 МВт. В терминологии французских экспертов изменяется так называемый свободно качающийся тип колебаний (рис. 2.2, б). В общепринятой терминологии это балочные колебания с незакрепленным нижним концом. Главные причины такого явления — начальные стадии старения прижимных трубчатых элементов и наличие зазоров в шпоночных соединениях.

Износ нижних шпонок шахты-корпус имеет свои диагностические особенности. Для новых блоков (до трех топливных циклов) контакт между шахтой и корпусом в нижних шпоночных соеди-

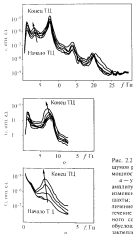


Рис. 2.2. АСРМ виброанализ реактора PWR (EDF, Франция) мощностью 900 МВт [5]:

а — уменьшение частоты и увеличение амплитуды вибраций ТВС, приводящее к изменению вибрационного состояния шахты; б — увеличение частоты и увеличение амплитуды вибраций шахты в течение ТЦ; в — изменение вибрационного состояния шахты за кампанию, обусловленное износом условий ее закрепления в шпоночных соединениях.

независимо от того, обеспечивается ли соответствующим пик (рис. 2.2 а) имеет небольшую амплитуду в начале топливного цикла. Для блоков со сроком эксплуатации более четырех лет начинает сказываться износ поверхностей контакта в шпонках шахта-корпус и к концу топливного цикла, как правило, растет соответствующий пик АСПМ нейтронного шума.

Обладая значительным собственным исследовательским потенциалом, ФРГ одной из первых стала производить промышленные СВШК [9–11]. В настоящее время на всех немецких блоках АЭС с реакторами типа PWR установлены системы виброшумового мониторинга оборудования РУ, охватывающие, в том числе, и вибромониторинг ВКУ и ТВС [12–16].

Опытные эксперты длительное время производят централизованный анализ виброшумовых образов реакторов различных АЭС. Немецкие эксперты так же, как и французские, выделяют те же три определяющих вибросостояния ВКУ и ТВС механических явления, перечисленные выше. Дополнительно к внешнему нейтронному шуму и сигналам датчиков вибраций, установленных на крышке реактора, анализируют сигналы внутризонного нейтронного шума. Последние позволяют получить детальные образы вибраций ВКУ и топлива.

В обзорной работе [16] приводится эмпирическая зависимость, в соответствии с которой уменьшение приложенного вертикального усилия на шахту до 70% номинала приводит к уменьшению собственной частоты маятниковых вибраций шахты всего лишь до 94%. Эта зависимость, требующая высокого спектрального разрешения при анализе сигналов, позволяет выставить нижний порог, пересечение которого означает недопустимо низкое приложенное усилие на шахту.

В той же работе нормируется скорость изменения частоты вибраций шахты, возникающих при износе поверхностей контакта в нижних шпоночных соединениях. Считается, что уменьшение собственной частоты вибраций шахты, составляющее не более $0,1 \text{ Гц/год}$, — приемлемый темп износа.

К изменению вибросостояния ТВС приводит эффект радиационной релаксации дистанционирующих решеток ТВС. На рис. 2.3 показаны два спектра сигналов внутризонного нейтронного детектора, соответствующих свежечу топлину и топлину у которого истекает срок эксплуатации.

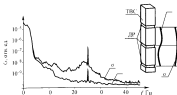


Рис. 2.3. АСПМ внутризонного нейтронного детектора, соответствующее своему топливу с жестким закреплением топлив в ДР (а) и топливу последнего года эксплуатации, у которого отсутствует жесткое закрепление некоторых топлив в некоторых ДР (б) (РВР, Германия). Справа приведены соответствующие формы колебаний топлив [13]

При жестком закреплении топлив в дистанционирующих решетках (своего топлива) собственная частота вибраций фрагмента топлива, заключенного между двумя ближайшими ДР, составляет примерно 70 Гц. Если в парах топлив—ДР теряется жесткость (появляется зазор), то эта частота, очевидно, будет снижаться. Каждый топлив имеет индивидуальные особенности закрепления в различных ДР, поэтому при радиационном изменении свойств ДР частоты вибраций топлив будут изменяться в широком диапазоне. Возникший локальный максимум в АСПМ на частоте 24 Гц свидетельствует о том, что чаще всего потеря жесткости ДР происходит таким образом, что топлив остается закрепленным не в каждой ДР, а в ДР, расположенных через одну. Близость частоты колебаний фрагментов топлив (24 Гц) к оборотной частоте ГЦН (25 Гц) может привести к резонансному возбуждению колебаний топлив и ускоренному износу их оболочек.

На немецком реакторе типа KKG-PWR с периодичностью один раз в неделю в течение 14 топливных циклов (рис. 2.4) фиксировались сигналы датчиков перемещений, установленных на крышке реактора, датчиков вне- и внутризонного нейтронного потока [14, 16]. Выделялись диапазоны частот, в которых доминировали чинниковые колебания шахты (6—9 Гц); маятниковые колебания корпуса реактора (10—12 Гц); вертикальные колебания коп-

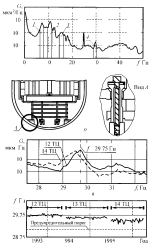


Рис. 2.4. АСТИМ сигналы ДАП (а), конструкция многотопкового опорного узла (б) и трек резонансной частоты данного узла (в, д), найденный в трек последних топливных циклов [14];

а (1–4 – два цикла доминирования эффектов): 1 – магнитные колебания плиты; 2 – магнитные колебания корпуса; 3 – перекальные колебания корпуса; 4 – магнитные колебания опорного узла шахты

пуса реактора (14–18 ГГц); магнитные колебания нижнего опорного узла шахты (29–31 ГГц)

При анализе трендовых характеристик (изменения во времени

местоположении резонанса на ось частот за весь период наблюдения) было найдено, что в трех последних топливных циклах монотонно уменьшается резонансная частота маятниковых колебаний нижнего опорного узла шашты (от 29,75 до 29,25 Гц). И хотя нижний предупредительный порог (28,75 Гц) еще не был достигнут было принято решение осмотреть данный труднодоступный узел в ближайшем плановом ремонте. Оказалось, что ослабло крепление одной из шпилек нижнего узла. Развитие данной аномалии могло повредить как различные ВКУ реакторатак и ТВС.

На немецких реакторах с кипящим теплоносителем провели контроль вибраций ТВС [16] с помощью четырех штатных внутризонных нейтронных детекторов (рис. 2.5), что оказалось эффективным средством сравнения различных конструкций ТВС.

На рис. 2.6 представлены АСПМ сигнала одного и того же ДПЗ но для разных конструкций ТВС (сигналы регистрировали до и после перегрузки ТВС).

Изменились не только амплитуда и частота (от 3,5 до 3,3 Гц) основной гармоник, но и форма АСПМ. На кривой *б* (см. рис. 2.6) можно разглядеть вторую и третью гармоники. Уже на основе этой информации можно заключить, что ТВС, которой соответствует кривая *а*, представляет собой более жесткую конструкцию.

Наблюдение в течение нескольких топливных циклов за изменениями спектральных образов сигналов внутризонных нейтронных шумов позволяло сделать вывод, что уменьшение частоты основной гармоник по мере выгорания топлива обусловлено изменением жесткостных свойств ТВС. За один год частота резонанса уменьшается в среднем на 0,2 Гц (рис. 2.7).

Основоположник виброшумовых методов диагностики ВКУ в эксплуатационных условиях американский исследователь Тай приложил огромные усилия, чтобы довести эти методы до экс

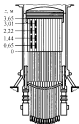


Рис. 2.5. Расположение ДПЗ в ТВС BWR (Германия) [16]

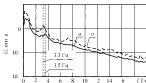


Рис. 2.6. АСПМ от вала одного и того же ДПЗ при разных ко- структурах ТВС [16]; а — до вибрации; б — после вибрации

ситуационного уровня [17–21]. В США внедрение виброшумовых методов началось с контроля вибраций шахты [22–25]. И в настоящее время на АЭС США виброшумовая диагностика ВКУ производится в основном с помощью внезонных нейтронных шумов. Периодическое измерение их введено в регламент технического обслуживания всех АЭС с реакторами типа PWR. С этой целью фирма Westinghouse разработала и поставляет на АЭС СВШК, ориентированные, главным образом, на работу с ИК [26–27]. На рис. 2.8 показаны АСПМ сигнала ИК, полученные с помощью такой системы.

На АСПМ отмечены шесть резонансных особенностей, каждая из которых обусловлена вибрациями различных ВКУ и корпуса реактора. Программное обеспечение СВШК позволяет вычислить параметры каждого резонанса (центральную частоту, диапазон частот, интеграл в диапазоне частот) и проследить их изменение во времени.

На АЭС США часто применяют упрощенный метод мониторинга, когда весь наблюдаемый диапазон частот разбивается на непересекающиеся участки, в каждом из которых доминирует всего один источник. Например, нейтронный шум реактора АЭС McGuire (США) [25] для целей диагностики представляется как совокупность следующих источников:

0–2,0 Гц — эффекты температурных и медленных реактивных изменений в АкЗ;

2,0–5,5 Гц — вибрации ТВС

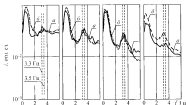


Рис. 2.7. АСПМ сигнала ступенчатого ДПС в 4 м (а) и 5 м (б) топ винтов НК-88 (DWB, Германия)

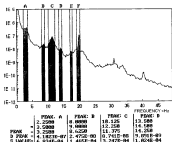


Рис. 2.8. Форма представления АСПМ сигнала НК системы вибрации по алгоритму формы Weibull-Gamma [23]

3,5–6,5 Гц — диапазон вычисления температурного коэффициента реактивности;

6,5–11,5 Гц — вибрация шпалы АкЗ

11,5–16,0 Гц — 2-е моды вибрации шахты Аз3

16,0–19,5 Гц — вибрации корпуса реактора;

19,5–20,0 Гц — диапазон оборотной частоты ГДН

20,0–30,0 Гц — высшие моды колебаний корпуса реактора

Низшая собственная частота ТВС f_0 может изменяться в течение топливного цикла из-за частичной потери жесткости ТВС в условиях радиационного облучения. Чаще всего она уменьшается с увеличением времени эксплуатации, так как жесткость ДР уменьшается. Но известны случаи увеличения частоты вибраций ТВС с увеличением мощности реактора из-за увеличения ее жесткости при температурном расширении твэлов. Изменение частоты вибраций ТВС оценивается величиной $(df_0/dt)/f_0$, которая как правило, очень мала. Например, для ТВС фирмы Babcock & Wilcox ее значение составляет $-0,00018$ мес⁻¹.

В работе [28] впервые опубликованы данные, связанные с отказом ТВС на АЭС Аугри-1 с двухконтурным реактором типа PWR мощностью 657 МВт разработки фирмы Westinghouse. На нем в 4-м топливном цикле произошел массовый отказ ТВС (табл. 2.1)

Основная причина отказов — фреттинг-износ в парах ДР—твэл обусловленный аномальными вибрациями ВКУ и ТВС. С тех пор (с 1993 г.) на АЭС проводят интенсивные расчетно-экспериментальные исследования вибраций ТВС. Вначале конструкция ДР была изменена таким образом, чтобы увеличить жесткость соединения ДР—твэл, контролируемую измерением усилия протягивания твэлов при изготовлении ТВС. Но в 6-м топливном цикле вновь случился массовый отказ ТВС из-за их повышенных вибраций. После проведения стационарных полномасштабных вибрационных испытаний ТВС был найден резонанс конструкции, возбуждаемый потоком ТН, нивелирующий большую амплитуду. Его наличие подтвердилось и расчетными моделями, и нейтронно-шумовыми измерениями, которые начали регулярно проводить с 1997 г.

В результате конструкция ТВС была существенным образом переработана, и в 8-м топливном цикле активная зона состояла только из новых ТВС. Одновременно были выработаны вибрационные диагностические пороги по спектральным образам нейтронных шумов (по амплитуде и частоте), превышение которых недопустимо в эксплуатационных условиях. С тех пор, как утверждают авторы, отказы ТВС прекратились.

Таблица 2.1 Эксплуатационные данные по отказам ТВС на АЭС Ангра I [28]

Номер цикла	Период времени	Тип ТВС	Число ТВС	О. отказ	Комментарии
	01/86—01/86	A	41	Нет	
		B	36		
		C	44		
2	10/86—10/89	A	1	Нет	Механизм повреждения не определен
		B	36	I	
		C	44		
		D	40		
	01/90—08/91	C	41	I	То же
		D	40	Нет	
		E	40		
4	05/92—03/93	C	1	Нет	Фреттинг-коррозия в паре ДР—тепл.
		D	40	7	
		E	40	4	
		F	40	1	
	12/94—03/96	A	36	Нет	Новая конструкция ДР, обеспечивающая большую жесткость в паре ДР—тепл.
		B	8		
		C	1		
		F	36		
		G	40		
6	06/96—09/97	G	40	8	Добрый отказ. Фреттинг-коррозия в паре ДР—тепл. Фреттинг-коррозия в паре ДР—ДР соседних ТВС.
		H	40	I	
		J	41	Нет	
	12/97—10/98	F	4	I	Механизм повреждения не определен
		H	36	I	
		J	41		
		L	40		
8	12/98—03/00	M	41	Нет	То же
		N	40		
		P	40		
9	03/00—04/0	M	21	Нет	
		N	40		
		P	40		
		Q	4		
		R	16		

Примечательно, что при поиске оптимальной конструкции ТВС и в частности, при выборе ее жесткостных характеристик, подбирали собственные частоты и ТВС, и теплооб в зависимости от числа ДР. В табл. 2.2 приведены рассмотренные комбинации этих

Таблица 2.2. Первые собственные частоты ТВС и твэлов для различных конструкций ТВС [28]

Первая собственная частота ТВС, Гц	Первая собственная частота твэлов, Гц
3,73	38,9
2,55	28,4
1,66	21,7
3,71	33,4
2,53	27,4
1,66	21,2
3,57	19,0
2,52	18,3
1,65	16,4
3,13	8,9
2,41	8,3
1,65	8,6

частот для различных конструкций ТВС. Собственные частоты твэлов и ТВС не должны совпадать с набежными частотами (гармоники и субгармоники оборотной частоты ГЦН), с собственными частотами колебаний шакты и корпуса, с частотами АСВ.

На рис. 2.9, а показаны расчетные типы собственных колебаний и собственных частот ТВС, начиная от 1-й моды на частоте 2,55 Гц и заканчивая 6-й модой на частоте 18,17 Гц. На рис. 2.9, б изображены типы колебаний твэлов (восемь узлов распределения соответствуют местоположениям восьми ДР). Они происходят на близких частотах (1-я мода — 28,4 Гц, 2-я мода — 34,9 Гц, 3-я мода — 36,7 Гц), но по пространственному распределению амплитуд вибраций существенно различаются. Наиболее опасна 1-я мода, у которой максимальная амплитуда вибраций наблюдается в первом пролете между 1-й и 2-й ДР.

Длительный виброшумовой анализ производится на Борселльской АЭС (Нидерланды) с двухпетлевым реактором типа PWR мощностью 480 МВт. Начиная с 1974 г., там сменилось три поколения СВШК [29—32]. В 1997 г. после 24-го топливного цикла были проведены работы по продлению назначенного срока эксплуатации РУ, в ходе которых модернизировалась и СВШК. В настоящее время виброшумовой контроль ведется в реальном вре-

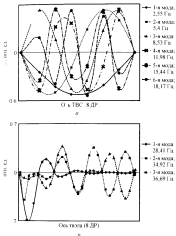


Рис. 2.9. Первые шесть типов собственных колебаний ТВС (а) и три высших собственных колебаний системы в ТВС + 8 ДР (б) [28]

чения (а не по отсроченному анализу, как это принято везде) силами экспертов диагностического центра, удаленного от АЭС на 200 км, которые тщательно анализируют вибросостояние ВКУ и ТВС [32]. На рис. 2.10 представлены АСПМ четырех внезонных нейтронных камер. Пики АСПМ в диапазоне частот 10–17 Гц обусловлены различными типами вибраций шахты.

С помощью специально разработанных методов эти четыре

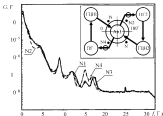


Рис. 2.10 АСПМ ИК (Воронежская АЭС, Интервалы) [32]

АСПМ пересчитываются в вибрационные перемещения шахты в абсолютных единицах, которые отображаются в полярных координатах (рис. 2.11). Средний размах колебаний шахты не превосходит 20 мкм, причем преимущественные направления колебаний отсутствуют. Таким образом, в качестве диагностических признаков принято не только абсолютное перемещение шахты, но и направление ее вибрации, в частности, особо неблагоприятным считается однонаправленный тип колебаний.

Об успешных расчетно-экспериментальных исследованиях по виброшумовой диагностике ВКУ и ТВС сообщается в [34]. На корейской АЭС Yonggwang с реактором типа PWR в несколько этапов были проведены нейтронно-шумовые эксперименты. По вне- и внутризонному нейтронным шумам были получены спектральные характеристики, резонансные особенности которых интерпретировали расчетно. Для этого использовали широко распространенный код ANSYS. Полученные расчетом собственные частоты колебаний шахты (7,5 Гц — 1-я мода балочного типа колебаний и 14,5 Гц — 1-я мода оболочечного типа колебаний шахты) совпали с частотами соответствующих резонансов экспериментальных спектральных характеристик сигналов ИК (рис. 2.12).

Расчетные типы колебаний ТВС также, по мнению авторов, совпали с экспериментальными данными. На рис. 2.13 приведе-

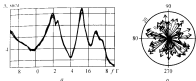


Рис. 2.11. Зависимость вибрационных параметров β от частоты (α) — для изотропного и анизотропного материалов [33]

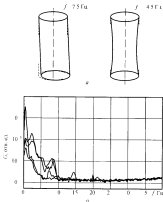


Рис. 2.12. Расчетные типы колебаний штыря: 7,5 ГГц — 1-я мода базового типа (а) и 4,9 ГГц — 1-я мода обшивочного типа (б) и АСТМ-стекла 18К (в) [34]

ны взятые спектральные характеристики (когерентности, фазы, ВСПМ) сигналов вне- и внутризонных нейтронных детекторов. На этих экспериментальных функциях выделены две расчетные спектральные особенности: на частоте 2,3 Гц — 1-я расчетная мода колебаний ТВС и на частоте 5,8 Гц — 2-я расчетная мода колебаний ТВС. На частоте 2,3 Гц все вне- и внутризонные сигналы синфазны, на частоте 5,8 Гц — синфазны или противофазны в зависимости от того, в какой части АкЗ (верхней или нижней) расположен внутризонный детектор.

Однако чтобы доказать вибрационную природу происхождения данных резонансов, необходимо исследовать еще и глобальными нейтронный шум, и транспортируемые с потоком ТН источники нейтронных шумов. Например, фазы на частоте 2,3 Гц будут всегда нулевыми из-за глобального нейтронного шума реактивности. Частота 5,8 Гц находится в области линейной фазы (см. рис. 2.13), возникающей из-за транспортного эффекта, и значение фазы будет нулевым для нижнего внутризонного датчика и возможно, равным π для верхнего датчика. Максимумы спектральной характеристики на частотах 2,3 и 5,8 Гц, вероятно, являются элементами так называемой *link*-структуры, которая появляется когда присутствуют теплофизические неоднородности перемещаемые с потоком ТН.

Нетривиальную позицию по созданию промышленных СВШК занимает Япония. Японские специалисты активно участвуют в разработке виброшумовых методов, в частности, на всех конференциях SMORN большую долю докладов представляют японские исследователи [35—41], а конференция SMORN-IV состоялась в Токио. Фундаментальный труд по реакторным шумам написан известным японским физиком Сайто [42], а одним из авторов многомерного авторегрессионного анализа является японский исследователь Огума.

В Японии проведены национальные программы по исследованию виброшумовых характеристик всех действующих энергетических реакторов [43—46]. В этих целях созданы уникальные исследовательские ПТК, учитывающие особенности доступных шумовых каналов на каждой РУ, но статус штатных систем они не приобрели. В результате этой деятельности стали известны виброшумовые признаки для диагностирования ВКУ и ТВС всех блоков японских АЭС.

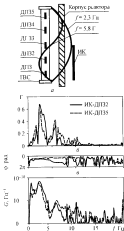


Рис. 2.13. Расчетные частоты (2,3 и 5,8 Гц) первых двух типов колебаний ТБС (а), когерентности (б) между сигналами вне- и внутрисетевых нейтральных детекторов, фазы (в) и ВСПМ (г) сигналов вне- и внутрисетевых нейтральных детекторов [34]

Однако далее исследования дело не идет, оформление этих расчетно-экспериментальных достижений в виде СВШК отложено на неопределенное время. Японские чиновники объясняют такую позицию тем, что на японских АЭС никогда не было инцидентов из-за аномальных вибраций элементов РУ, и внедрение дорогостоящих промышленных СВШК экономически не оправдано. Они считают, что развитие и модернизация нашла в тех

странах, где такие системы стали востребованы из-за вибрационных инцидентов (Германия, Франция, США). В настоящее время в Японии рассматривается возможность создания промышленных СВШК на уже существующем детекторном оснащении (мю-три- и везонные нейтронные детекторы, акселерометры системы обнаружения свободных предметов и термопары).

Приведенные в данном разделе спектральные образы вибрации ВКУ и ТВС различных зарубежных типов реакторов и их зависимость от изменения условий закрепления или износа и старения невозможно перенести напрямую на российские реакторы типа ВВЭР. Различия в конструкции РУ и, в частности, различия в конструкциях ВКУ, ТВС, шпоночных соединений будут определять индивидуальные спектральные образы нейтронного шума. Тем не менее можно сделать вывод о том, что собственные частоты элементов ВКУ и ТВС близки для различных типов реакторов, если только соответствующие массогабаритные характеристики существенно не различаются. Также и тенденции (тренды) спектральных вибрационных характеристик за кампанию или за весь срок эксплуатации чаще всего близки для различных типов реакторов если только совпадают механизмы износа и старения.

2.2 Первый международный стандарт по вибрациям ВКУ

В 1999 г. в форме рекомендаций вышел первый международный стандарт по вибрациям ВКУ реакторов с водой под давлением — IEC 61502 [47]. Его разработала международная электротехническая комиссия (IEC), которая считает, что со старением реакторов вероятность отказов ВКУ будет расти, а действенным средством их обнаружения на ранней стадии является виброшумовой мониторинг.

Международный коллектив разработчиков стандарта зафиксировал, быть может, банальные положения реакторно-шумовой диагностики, но достиг основной цели: в рекомендательной форме привлечь внимание конструкторов РУ и эксплуатирующих АЭС организаций к системам ранней диагностики ВКУ как к необходимому средству их технического обслуживания.

В стандарте в самом общем виде предъявляются требования к внедренному нейтронно-шумовому каналу контроля вибраций

ВКУ (дислокацию детекторов, полосы частот, коэффициентам усиления и т.д.) и к акустическому каналу с акселерометрами в качестве первичных преобразователей. В стандарте каждый раз подчеркиваются особенности советских реакторов типа ВВЭР, которые необходимо учесть, чтобы реализовать тот или иной метод диагностики. Даются рекомендации по измерительным каналам многодетекторной СВШК. Здесь явно прослеживается влияние СВШК фирмы Siemens.

Прежде чем устанавливать СВШК на конкретный реактор, стандарт рекомендует проводить расчетные исследования собственных частот и типов колебаний ВКУ, которые затем следует подтверждать макетными и стендовыми экспериментами.

Особая роль отводится натурным исследованиям при осуществлении ПНИ. Стандарт отмечает важность калибровки датчиков СВШК с помощью датчиков вибраций, установленных на ПНИ по временной схеме непосредственно на ВКУ и ТВС. После окончания ПНИ, когда временные датчики вибраций на ВКУ и ТВС будут демонтированы, датчики СВШК (прежде всего, датчики вибраций на крышке корпуса реактора) должны быть прокалиброваны в абсолютных единицах вибрационных перемещений ВКУ и ТВС. Это очень актуальный раздел стандарта, так как большинство АЭС введены в эксплуатацию в те времена, когда СВШК еще не существовали.

Существует единственный случай подобной калибровки на реакторе российского производства. На блоке I АЭС Temelin с реактором типа ВВЭР-1000 СВШК была заложена в проект, изготовлена фирмой Westinghouse и функционировала уже на ПНИ (2000 г.) вместе с временными внутризонными многокомпонентными акселерометрами. Запущенный примерно в то же время блок I Волгодонской АЭС СВШК не имеет, но программой обслуживания российских АЭС системами диагностики внедрение СВШК все же предусмотрено в ближайшем будущем и на этом реакторе. Однако теперь потерянную на ПНИ виброшумовую информацию восполнить трудно.

2.3. Виброконтроль ВКУ в ТВС реакторов типа ВВЭР зарубежными программно-техническими комплексами

2.3.1 ВВЭР-440

Виброшумовой контроль на АЭС Greifswald (ГДР). Для вибрационных инцидентов на АЭС Greifswald с ВВЭР-440 (проект В-230) стимулировали развитие виброшумового анализа в ГДР. В 1972 — 1976 гг. происходили anomальные вибрации аварийных регулирующих кассет (АРК), в 1985—1986 гг. — anomальные вибрации шахты [48—49]. В первом случае вибрации были столь велики, что в местах соударения ДР с чехлом АРК появились отверстия в чехле (рис. 2.14), и, как выяснилось при ППР, в некоторых АРК топливная и поглощающая части оказались разъединенными. После установления вибрационной причины дефекта конструкцию топливной части АРК изменили для уменьшения расхода ТН через нее. Для контроля вибраций впервые на ВВЭР-440 были установлены интрузионные нейтронные детекторы прямого заряда (ДПЗ). На российских АЭС первые блоки с ВВЭР-440 эксплуатировали без ДПЗ, только спустя некоторое время ДПЗ были введены в проект, ими стали осматривать 11 рабочих кассет (РК), расположенных рядом с АРК (для проекта В-230) и 36 РК для проекта В-213.

В 1977 г. на базе Института ядерных исследований (г. Россендорф, ГДР) была организована диагностическая группа. Этот Институт начал шумовые исследования на АЭС Greifswald еще в 1974 г., а в 1975 г. в нем была разработана и внедрена первая опытная СВШК.

Anomальные вибрации шахты на АЭС Greifswald (1985—1986 гг.) обнаружались сразу после ППР, так как размах флуктуаций нейтронного потока вырос на порядок по сравнению с тем же параметром в предыдущем топливном цикле. Далее, в течение всей кампании СКЗ внезонного нейтронного шума оставалось примерно постоянным. После выведения блока в ремонт износы нижних шпонок шахты (рис. 2.14), прижимных трубчатых элементов и поверхностей лабиринтного уплотнения были очень значительны, что потребовало существенных затрат на их восстановление.

Немецкие исследователи выполняли большой объем расчетных и экспериментальных работ по шумовой диагностике ВВЭР-440 [50—52]. Длительное наблюдение за внезонными нейтронами



Рис. 2.14. Чехол АРК с отверстиями в плоскости ДР (а) и загонка с канавчатой правой гранью (б) [49]

шумами на четырех блоках АЭС Greifswald позволило немецким исследователям установить диагностические пороги для контроля вибраций шахты по врезонному нейтронному шуму:

Уровень нормированного СКЗ	Менее 0,25%	0,25—0,40%	0,40—0,60%	Более 0,60%
Состояние	Очень хорошо	Хорошо	Удовлетворительно но требуется дальнейшее расследование	Неудовлетворительно

Еще до широкого распространения СВШК фирмы Siemens на АЭС Greifswald построили опытную СВШК с датчиками пульсации люциен-1, ДПЗ, датчиками врезонного нейтронного шума в двух уровнях и акселерометрами. Акселерометры устанавливали на крышке реактора, корпусе реактора и его верхнем блоке. На корпусе реактора акселерометры размещали в труднодоступных местах — на днище корпуса и на горизонте лабиринтного уплотнения.

В результате были разработаны уникальные методы контроля вибраций. Например, вибрацию шахты контролировали по взаимным спектральным характеристикам сигналов ИК и акселерометра, установленного на горизонте лабиринтного уплотнения (рис. 2.15). Возможность данных сигналов объяснили тем, что при

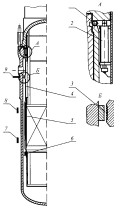


Рис. 2.13. Упрощенная схема элементов ВКУ ВВЭР-440, определяющих вибрации шахты, и датчики, установленные на АЭС Грейбвальд;

1 — трубчатый элемент; 2 — трубчатый блок; 3 — лабиринтное уплотнение; 4 — вывертка; 5 — тахо-м; 6 — вибродатчик; 7 — штокная ИК; 8 — веревка ИК; 9 — акселерометр

отклонении шахты от равновесного положения, как известно, изменяется поток нейтронов утечки на ИК, одновременно повышается уровень акустического шума вследствие увеличения паразитных протечек ТН через лабиринтное уплотнение (что и явилось предметом новизны).

Другой пример совместного использования акустического сигнала и сигнала нейтронного детектора приведен в работах [50, 51] Вибрации АРК, сопровождающиеся ударами о челок, фиксировались акселерометрами, установленными на верхнем блоке (на направляющих трубах АРК), и ДПЗ, расположенными в соседней РК. Корреляции этих сигналов оказались крайне слабыми. Тогда были предложены нетрадиционные методы анализа нестационарных случайных процессов. Обработывали не всю зарегистрированную реализацию НШ, а только те ее фрагменты, которые по времени сов

шакты и с ударами, обнаруженными по акустическому каналу. При этом применяли не прямой акустический сигнал, а его огибающую. Иными словами, акустические импульсы являлись своего рода синхронизмами, запускавшими регистрацию НШ в малом временном интервале. Затем производили статистическую обработку НШ в большом числе таких временных интервалов, после чего получали диагностические признаки, чувствительные к соударениям АРК.

Тщательно продуманное расположение нейтронных датчиков и акселерометров позволило немецким исследователям разработать методы оценки траектории АРК и шакты. Было экспериментально доказано, что вибрации и АРК и шакты сопровождаются соударениями. В АРК удары зафиксированы на горизонте шарнирного соединения поглощающей и топливной частей, вибрации шакты сопровождаются соударениями в нижнем шпоночном узле. Удар резко меняет траекторию шакты, например, он может скачкообразно изменить направление движения шакты на противоположное. Такие точки траектории несложно обнаружить, а их статистика (например, частота ударов) является диагностическим признаком. Для шакты частота соударений характеризует износ шпонок, для АРК — скорость теплоносителя как результат перераспределения интегрального расхода ТН между РК, АРК и межкассетным пространством.

СВШК фирмы Siemens. В 80-е годы фирма Siemens построила СВШК SÜS, которая сначала была внедрена на немецкие PWR различных конструкций, а затем — на несколько блоков АЭС с ВВЭР-440, причем принципы ее построения существенно образом не изменялись от одной продажи к другой. Можно считать, что с этого времени виброакустический контроль перестал реализовываться только опытными системами, а вышел и на промышленный уровень.

Впервые система SÜS за рубежом была внедрена на АЭС Чехословакия (в Чехии на АЭС Дукованы, в Словакии на АЭС Богуминце), а затем на двух блоках КоАЭС и двух блоках НВАЭС с ВВЭР-440 (проект В-230) [53, 54]. В работе [55] можно найти полный список всех систем локальной диагностики, поставленных фирмой Siemens. Стандартная конфигурация датчиков SÜS изображена на рис. 2.16. Датчики относительных перемещений (ДОП) установлены на основном оборудовании петель (ГЦН, ПГ), ДПД — в латунных и титановых нитках. ДАП — на крышке корпуса

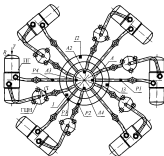


Рис. 2.16. Размещение датчиков системы SCS для BRSP-440:

I – инерциальная камера; *P* – ДИП; *T* – ДОП в тангенциальном направлении
A – ДОП в радиальном направлении; *A* – ДАП

ДОП – двуфункциональные датчики, способные измерять как микроперемещения при вибрациях оборудования, так и макроперемещения оборудования петель в динамических режимах с изменением температуры ТН. Тем самым SUS реализует еще одну важную функцию, тесно связанную с виброконтролем, – контроль перемещений опор основного оборудования при разогревах и расхолаживаниях.

Каналы измерения внешнего нейтронного шума SUS в разных странах строились силами заказчика системы. Это обусловлено спецификой нейтронных измерений, состоящей в том, что как правило, свободные измерительные каналы отсутствуют, или предназначены только для отечественных ИК, или выставляются особые требования по габаритным размерам, температуре окружающей среды, чувствительности, ресурсу, обеспечению безопасной эксплуатации и т.п. Иными словами, здесь нет универсаль-

ных технических решении, пригодных для любого реактора по этому фирма Siemens отдавала их разработку заказчику.

ДПС и акселерометры в составе системы SÜS не предусматривались. Таким образом, методические наработки [50—52] нельзя было реализовать на базе детекторного оборудования SÜS.

Строго говоря, фирма Siemens не предоставляет алгоритмы выбора диагностики в составе системы SÜS. С помощью программного обеспечения, которое является принадлежностью SÜS, осуществляют сбор, хранение, первичную обработку сигналов и некоторые спектральные оценки. Собственно диагностика, которая строится на основе этих спектральных оценок, отсутствует. Этим и обеспечивается универсальность SÜS по отношению к различным типам реакторов. Перед каждым циклом измерений пользователь выбирает одно из двух множества параметров спектральной оценки и заранее фиксирует не более 20 взаимных характеристик. Далее, в отсроченном режиме, на полученных АСПМ, ВСПМ и функциях когерентности выбирают некоторые резонансы, параметры которых заносят в электронную таблицу. Средствами данного программного продукта исследуют тренды резонансов по накопленной предыстории.

Другими словами, от пользователя системы требуются знания по интерпретации резонансов и по представительности множества резонансов. И то, и другое на момент внедрения SÜS на ВВЭР-440 являлось предметом предстоящих исследований. Необходимую первичную информацию о вибрационных свойствах ВКУ и ТВС можно было бы получить по результатам ПНИ, но во время пусков первых блоков ВВЭР-440 (более 30 лет назад) эти задачи в таком виде не ставились.

На АЭС Дукованы для интерпретации сигналов SÜS привлекали западногерманских специалистов [56]. После того как были получены авто- и взаимные спектральные характеристики сигналов ИК (рис. 2.17) с малым числом резонансных особенностей (случай факта ВВЭР), они не представили каких-либо доказательств в пользу того, что в том или ином диапазоне частот доминируют колебания ТВС. Например, фазы между сигналами всевозможных ИК были либо нулевыми, либо недостоверными. Эффектов противофазы собственных вибраций шахты и ТВС, выявлено не было.

Поиск доказательств был отложен до тех времен, когда к анализу помимо сигналов ИК можно будет привлечь и сигналы

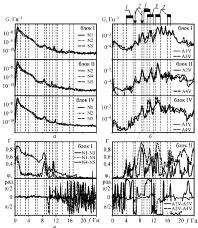


Рис. 2.17. Спектральные характеристики сигналов СУС на АЭС Дружина. АСПМ сигналов НК (а), их функции когерентности и фазы (б), АСПМ сигналов ДАП (в), их функции когерентности и фазы (г). Над графиками показаны поддиагоны доминирующих вибрационных источников: 1 – ТВС; 2 – корпус реактора; 3 – вала [3]

ДЛЗ. Тем не менее опыт контроля с немецких PWR был механически перенесен на ВВЭР-440. Такое обобщение было оправдано тем, что массогабаритные параметры ТВС АЭС Obrigheim (PWR, 350 MWt) и ВВЭР-440 подобны.

Кроме того, эта группа исследователей, обобщая виброшумовый опыт на немецких PWR разных конструкций, пришла к вы-

воду, что разные реакторы имеют очень близкие по расположению на оси частот вибрационные источники [57]. Например, как показано на рис. 2.18, диапазоны частот, где доминируют разные типы колебаний ТВС, одинаковы для трех разных конструкций немецких PWR. Они же совпадают по предположению авторов, с диапазонами частот вибраций ТВС ВВЭР 440.

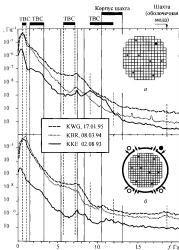


Рис. 2.18. АСПМ сигналов внутренних (а) и внешних (б) НЧ на трех PWR (Германия) [45]

1,5–3,0 Гц — вибрации ТВС с одним закрепленным концом;
4,0–6,0 Гц — вибрации ТВС с двумя закрепленными концами;
8,0–12,0 Гц — 2-я мода колебаний ТВС с двумя закрепленными концами.

В остальном сделаны привдоподобные выводы, совпадающие с результатами других исследований на Кольской АЭС и АЭС Рибз, которые были уже опубликованы к тому времени.

6,6 Гц — вынужденные колебания корпуса, вызванные АСВ;

8,5 Гц — вертикальные колебания корпуса совместно с ВКУ ГЦН, «холодными» трубопроводами, ПГ на частоте АСВ

11,5–13,5 Гц — магнитные колебания совместно с корпусом

16,0–17,0 Гц — вертикальные колебания корпуса.

На блоках АЭС Богуннице проблема нейтронно-шумовых измерений решена созданием отдельной, параллельной $\dot{S}\dot{U}\dot{S}$, нейтронно-шумовой системы (Neutron Noise System), позволяющей регистрировать шумы различных сборок ДПЗ совместно с ИК [58]. Применение этой системы не только значительно расширило возможности $\dot{S}\dot{U}\dot{S}$ по контролю вибраций ВКУ и ТВС, но и позволило оценивать поканальные расходы ТН.

Несомненно, системы $\dot{S}\dot{U}\dot{S}$ и Neutron Noise System должны взаимодействовать, как впрочем, должны взаимодействовать и другие системы способные дать дополнительную информацию о вибросостоянии ВКУ и ТВС, также, как система контроля вибраций ГЦН (MCP VMS) и система обнаружения освободившихся предметов ($\dot{K}\dot{U}\dot{S}$). В настоящее время локальные системы диагностики интегрируются в единую информационную систему с помощью надстройки программного обеспечения верхнего уровня.

Результаты эксплуатации системы $\dot{S}\dot{U}\dot{S}$ на российских АЭС рассмотрены ниже.

Венгерские системы виброшумового контроля. Начиная с 60-х годов в Венгрии Центральный институт физических исследований (KFKI), располагает мощным научным потенциалом по реакторно-шумовой диагностике, который начал складываться еще со времен исследований шумов реакторов нулевой мощности (нейтронных шумов критических сборок). Эта своеобразная школа научных кадров до сих пор поставляет высококлассных специалистов на АЭС различных стран и в научные центры Европы и Аме-

рики. Венгерские исследователи участвовали в разработке положений виброшумового анализа РУ

идентификации теплогидравлических источников НШ [59—65]

феноменологической теории НШ реактора с кипящим ТН [66—71]

многомерного авторегрессионного моделирования [72, 73];

шумового измерения температурного коэффициента реактивности [74—76];

методов контроля недогретого кипения ТН [77—82] вибрации шахты, ТВС, органов управления [83—87].

Венгрия не нуждается в зарубежных СВШК, а сама их производит, причем подход к диагностике отличается от идеологии фирмы Siemens. Полный список предлагаемых для поставки на зарубежные АЭС локальных систем диагностики можно найти в работе [88]. СВШК CARD, входящая в этот список, базируется на флуктуирующих компонентах штатных ИК, ДПЗ, термопар и ДПЛ. Кроме того, в качестве «внешних», накладных датчиков вибраций используются акселерометры. Эта система была поставлена на блок I Калининской АЭС с РУ ВВЭР-1000.

Уже из перечня измерительных каналов видно, что вибрации ВКУ и ТВС системой CARD контролируются лучше, а вибрации корпуса и основного оборудования петель — хуже по сравнению с системой SÜS. Кроме того с помощью системы CARD решают не только вибрационные задачи, но и теплогидравлические (шумовая оценка поканальных расходов и обнаружение недогретого кипения ТН — оценка постоянных времени термопар) и нейтронно-физические (шумовая оценка температурного коэффициента реактивности).

Каждая из перечисленных выше функций системы представляет собой алгоритмически законченный и программно реализованный метод шумовой диагностики. Разработчики системы попытались автоматизировать многоступенчатый процесс шумовой оценки какого-либо параметра или даже получения диагноза. На пример, оценка ТКР как отношение двух спектральных оценок с последующим интегрированием доведена до числа в физических единицах. Скорость ТН также оценивается в метрах в секунду. В отличие от SÜS, где выдаются только спектральные оценки, в которых надо вручную промаркировать резонансы, система CARD автоматически решает задачу контроля вибрации шахты с выла

чен амплитуды вибрации в микрометрах. Кроме того, пользователь имеет возможность применить по своему усмотрению весьма сложные вычислительные процедуры такие как многомерный авторегрессионный анализ.

Ориентация на штатные датчики, с одной стороны, удешевляет систему, но, с другой — накладывает ограничения на качество и объем измерений. Например, флуктуирующий компонент штатного сигнала может быть интегрирован, как, например, сигнал тормозов, или закодирован с тем, чтобы противостоять помехам, как сигнал ИК. Доступ к штатным сигналам может ограничиваться из соображений безопасности или вследствие того, что проектом не предусмотрено их двустороннее использование (сигналы ДПС).

Ориентация на акселерометры как на единственный тип датчиков вибраций в системе также имеет свои положительные и отрицательные стороны. Положительные — унифицированность технических решений и низкая стоимость измерительных каналов. Отрицательные — недостоверная низкочастотная область и невозможность построить на акселерометрах систему контроля тепловых перемещений оборудования, как это осуществляют при использовании ДОП.

По сообщениям венгерских специалистов трудно судить о том какие именно СВШК установлены в данный момент на четырех блоках АЭС Paks [64, 80, 85, 87]. Обладая несколькими группами поставщиков и значительным опытом эксплуатации шумовых диагностических систем, специалисты АЭС Paks с 1983 г. уже сменили три поколения СВШК.

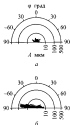
Особое внимание уделяется вибрациям шахты на рис. 2.19 представлены натурные данные.

По оценкам венгерских специалистов, чувствительность метода измерения среднего размаха колебаний шахты по внезонным нейтронным шумам — не хуже 10 мкм. Как сообщается [85, 87], в течение длительного времени на всех блоках АЭС Paks максимальная амплитуда вибраций шахты составляет не более 22 мкм.

Известны случаи, когда при номинальном интегральном расходе ТН по ЦК, его перераспределение по каналам и межканальным (межзональным) пространствам в виде локальных расходов аномально например в 1985 г. на АЭС Greifswald в 1997 г. — на

Рис. 2.19. Форма отображения результатов нейтронно-акустической диагностики шахты системой CARD:

а – балансирующее вибросостояние шахты (размах вибраций менее 10 мкм и отсутствие преимущественных направлений колебаний); б – размах вибраций до 80 мкм и наличие одного преимущественного колебаний [87]



6-юзе II АЭС Рака с РУ ВВЭР-440 (В 213). Там был зарегистрирован температурный «перекос» ТН на выходе активной зоны [87]. Различия подогрева в двух частях активной зоны достигала 5–6%.

По сигналам 36 сборок ДПЗ шумовым методом были измерены поканальные расходы ТН, которые в двух частях активной зоны составляли соответственно 3,00 и 3,35 м/с (рис. 2.20). Причиной этой аномалии были посторонние примеси в ТН.

В неясном виде перераспределение сил, обуславливающих вибращии ВКУ и ТВС, повлияло на их вибросостояние, несмотря на то что впоследствии каких-либо явлений повышенного износа не наблюдалось.

С 1997 г. на всех четырех блоках АЭС Рака производят регулярные шумовые измерения поканальных расходов и параметров вибросостояния ВКУ, РК и АРК.

2.3.2 ВВЭР 1000

Система CARD на Калининской АЭС. В 1991 г. система CARD среди других локальных систем диагностики была поставлена на блок I Калининской АЭС. В настоящее время, когда ее технические средства физически устарели или вышли из строя, можно сделать вывод о том, что в полной мере система не выполняла декларированные функции.

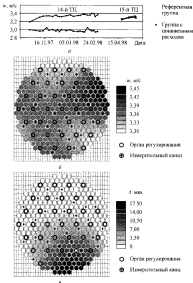


Рис. 2.28. «Перекос» температурного поля ТП на блоке III АЭС Рибс в 14-м тестовом цикле (а), результаты акустического измерения поперечных расколов (б) и гидростатомы ВКЗ и ТВС (в) [87]

Система не была введена в проект РУ, а значит, не подлежала обязательному регламентному обслуживанию. Не были получены качественные сигналы внезонных нейтронных шумов, поэтому объем вибродиагностики ВКУ и ТВС был сильно ограничен. В АСПМ сигнала ИК, начиная с 3 Гц, доминировал паразитный собственный белый шум детектора.

Это произошло по двум причинам: во-первых, вследствие потерь при преобразовании штатного частотно-импульсного сигнала ИК в аналоговый вид, во-вторых, в результате нехорошего расположения самого детектора (на значительном удалении от максимума поля энерговыделения).

Не были получены качественные флуктуации сигналов ТП, по этому оценка ТКР, для которой необходимы флуктуации сигналов ТП и ИК, была недостоверной.

Системе был выделен доступ всего к четырем каналам нейтронных измерений с ДПЗ, причем из семи ДПЗ одного КНИ были доступны всего четыре датчика. Таким образом, трудно было набрать статистику по вибрациям ТВС и сделать корректные вычисления поканальных расходов ТН. Система не выдавала информацию о вибрациях корпуса реактора.

Возможно, по этим причинам авторы системы сделали ошибочный вывод о частоте вибраций шахты [86, 88]. Собственная частота коллективных вибраций ТВС 2,6 Гц была ими принята за собственную частоту вибраций шахты. Авторы системы не располагали информацией о стендовых испытаниях ТВС, результатах виброиспытаний ТВС и шахты при ПНИ, а также о результатах расчетных работ, в которых показано, что частота 2,6 Гц обусловлена вибрациями ТВС.

СВШК на АЭС Темелин. Как отмечалось в предыдущих разделах, на блоке 1 АЭС Темелин фирма Westinghouse разработала вклад в проект (что существенно), изготовила и смонтировала СВШК до того, как начались ПНИ. В состав системы входят восемь ИК (беспрецедентный случай для ВВЭР), штатные ДПЗ термомпары и акселерометры. Еще одно достижение фирмы Westinghouse состоит в том, что СВШК, как и все другие системы контроля и диагностики, уже являются элементами глобальной станционной сети, построенной по уникальной технологии ALLY [89, 90].

ALLY представляет собой глобальную систему контроля и диагностики, функционирующую в многоуровневой распределенной компьютерной среде и интегрирующую все локальные диагностические ПТК с традиционными системами контроля, управления и поддержки оператора.

ALLY предоставляет возможности собственной организации информационного потока между подсистемами, как в режиме реального времени, так и в режиме обмена на уровне архивов, что делает из совокупности локальных ПТК единую систему контроля и диагностики.

С помощью ALLY ПТК, обладающие существенно разными свойствами, объединяются в сетевую структуру типа источник информации — потребитель информации. Частотный диапазон сигналов СОСП — десятки килогерц, а системы оценки остаточного ресурса — доли герц, система СОСП — реального времени, а система виброакустической диагностики — отсроченного анализа. Разные локальные системы могут функционировать под управлением разных операционных систем (WINDOWS, DOS, UNIX и т.п.). С помощью ALLY осуществляется информационное обеспечение как оперативного персонала на блочном ште управлениия (БШУ), так и диагностического персонала на специально организованных автоматизированных рабочих местах. Технология ALLY дает широкие возможности для осуществления новых алгоритмов контроля и диагностики (мощная библиотека макроопераций) с учетом взаимной информации, распределенной по различным ПТК.

ALLY является экспертной системой, интеллектуальность которой обеспечивается качеством экспертной информации. В то же время и собственно СВШК обладает следующими недостатками:

- отсутствие на момент пуска блока датчиков пульсаций давления ТН, т.е. отсутствие прямой измерительной информации о силах, вызывающих вибрации оборудования;

- отсутствие датчиков виброперемещений на ПГ, ПЦН и корпусе РУ, традиционно применяемых в других СВШК (вместо них установлены акселерометры, качество сигналов которых в области низких частот — там, где и наблюдаются наиболее важные вибрационные эффекты, — сомнительно);

отсутствие алгоритмов, выделяющих из многоканальных записей сигналов СВШД диагностические признаки вибросостояния шахты, ТВС корпуса реактора, основного оборудования петель и т.п. В этой части СВШК АЭС Темелин во многом подобна системе SÜS.

В настоящее время СВШК находится в стадии накопления спектральных образов различных элементов РУ.

СВШК SÜS-95 на Балаковской АЭС. Система SÜS 95 производства фирмы Siemens является модификацией систем, применяющихся на АЭС Германии. SÜS-95, установленная на Балаковской АЭС, укомплектована измерительными каналами российского производства. По организационно-техническим причинам ее внедрение на Балаковской АЭС происходит очень медленно. От уже рассмотренной СВШК SÜS SÜS-95 отличается увеличенным числом ДОП в петлях и ДПД, установленными во всех горячих и холодных нитках четырех петель, а по существу, SÜS-95 унаследовала все преимущества и недостатки SÜS.

Качество SÜS-95 значительно повысится, если эта система будет способна обрабатывать сигналы ДПЗ: будут получены качественные сигналы внезонных нейтронных детекторов в достаточном количестве; будет поставлено новое диагностическое программное обеспечение, в котором заложены характерные диагностические признаки, свойственные ВВЭР-1000 вместе с диагностическими порогами; система будет обеспечена нормативно-технической документацией.

Важно, чтобы система обслуживалась (поддерживалось работоспособное состояние, проводились периодические измерения) в штатном порядке.

Список литературы

1. Bernard P., Brillou A., Carre J.C. Neutron noise measurements of PWR's (SMORN-II) // Prog. Nucl. Energy. 1977. Vol. 1. P. 333.
2. Bernard P., Cloas J., Messingairal C. PWR core monitoring by in-core noise analysis (SMORN-III) // Prog. Nucl. Energy 1982 Vol 9 P 341—346.
3. Bernard P., Messingairal C., Carre J.C. Quantitative monitoring and diagnosis of French PWR's — internal structures vibrations by ex-core neutron noise and accelerometers analysis (SMORN-III) // Prog. Nucl. Energy. 1982. Vol. 9. P. 465—468.

- 4 **Thumble** vibration analysis and monitoring on 1300 and 900 mw reactors using accelerometers and in core neutron noise / A. Trenty, C. Puyal, C. Vincent *e.a.* // *Proc. SMORN-IV*, 1985, Dijon, France.
- 5 Trenty A., Puyal C., Kljajević H. SINBAD, a data base for PWR internal vibratory monitoring // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI*, May 19–24, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 — Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 21.01.
- 6 Trenty A. Operational feedback on internal structure vibration in 54 French PWRs during 300 fuel cycles // *Prog. Nucl. Energy*. 1995. Vol. 29. N 3/4. P. 347–356.
- 7 **Monitoring and aid to diagnosis of France PWRs.** / A. Jousellin, A. Trenty, J.C. Bérus *e.a.* / *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VII*, June 19–23, 1995, Avignon, France. Session 7 — System feedback experience and new system development. Vol. 2. P. 7.4.
- 8 **Bernard P.** Monitoring, diagnostic tools and organization for machines at EDF. Operational monitoring of primary circuit components. Regional Workshop IAEA. 28–31 august 2003, Yverdon.
- 9 **Wach D.** The analysis at-power neutron flux noise in the frequency range of vibrating reactor structures // *Ann. Nucl. Energy*. 1975. Vol. 2. P. 353.
- 10 **Wach D., Sunder R.** Improved PWR neutron noise interpretation on detailed vibration analysis (SMORN-II) // *Prog. Nucl. Energy*. 1977. Vol. 1. P. 309.
- 11 **Bastie W., Sunder R., Wach D.** On-line vibration monitoring of PWR internals // *ANS/ENS topical meeting on thermal reactors safety*, 1980, Knoxville.
- 12 **Bastie W., Sunder R., Wach D.** Experiences and results with COMOC — an on-line vibration analysis and monitoring system (SMORN-IV) // *Prog. Nucl. Energy*. 1985. Vol. 13.
- 13 **Van Nickerk F., Sunder R.** COMOS — an on-line system for problem oriented vibration monitoring (SMORN V) // *Prog. Nucl. Energy*. 1987. Vol. 21. P. 155–171.
- 14 **Experiences and results with COMOS — an on-line vibration analysis and monitoring system** / R. Sunder, M. Balzani, K. Kiesinger *e.a.* // *Proc. SMORN-VI*. 1991. Vol. 1. P. 5.01–5.12.
- 15 **Wohling H.-J., Klinger K., Stollen H.** Vibration monitoring of KWU pressurized water reactor — review, present status and further development (SMORN-VIII) // *Nucl. Technology*. 1988. Vol. 80. P. 367.
- 16 **Kollbassoff A., Sunder R.** Lessons learned with vibration monitoring systems in German nuclear power plants (SMORN-VIII) // *Prog. Nucl. Energy*. 2003. Vol. 43. N 1–4. P. 159–165.
- 17 **Tile J.A.** Reactor noise monitoring for malfunctions // *React. Techn.* 1971. Vol. 14. N 4. P. 354.

18. **Thie J.A.** Theoretical considerations and their application to experimental data in the determination of reactor internals' motion from stochastic signals // *Ann. Nucl. Energy*. 1975. Vol. 2. P. 253–259.
19. **Thie J.A.** Neutron noise sources in PWR's (SMORN II) // *Prog. Nucl. Energy*. 1977. Vol. 1. P. 283–286.
20. **Thie J.A.** Core motion monitoring // *Nucl. Technol.* 1979. Vol. 45. N 1. P. 5–18.
21. **Thie J.A.** A review of the OECD specialist meeting on continuous monitoring techniques for assuring coolant circuit integrity // *Nucl. Safety*. 1986. Vol. 27. N 2. P. 193.
22. **Robinson J.C., Sharckhi F.** Determination of core barrel motion from the neutron noise spectral density data-scale factor // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* 1976. Vol. 23. P. 458–462.
23. **Robinson J.C., Hardy J.W., Shambles G.R.** Monitoring of core support barrel motion in PWR's using ex-core detector // *Prog. Nucl. Energy*. 1977. Vol. 1. P. 369–372.
24. **Thompson J.P., McCay G.R., Lubin C.T.** Experimental value of percent variation in root-mean-square ex-core detector signal to the core barrel amplitude scale factor // *Nucl. Technology*. 1980. Vol. 48. P. 122–127.
25. **Pressell G.M.** Duke power's investigation of changing neutron noise signatures at McGuire nuclear unit 1 during recent cycles of operation // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI*, May 19–24, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 — Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 17, 20.
26. **Fry D.N., Harne G.P., Mayo C.W.** Report of the first United States conference on utility experience with neutron noise analysis // *Prog. Nucl. Energy*. 1985. Vol. 15. P. 503–511.
27. **Reactor internals and core support monitoring system/** T. Bogard, T. Koolosky, S. Lowenfeld, N. Singleton // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI*, May 19–24, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 — Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 19, 01.
28. **Barbosa E., Pereira J., Silva J.** Angra 1 fuel assembly flow induced vibration monitoring and inspection (SMORN-VIII) // *Prog. Nucl. Energy*. 2003. Vol. 43. N 1–4.
29. **Drugi J.B., Türkcan E.** Borssele PWR noise measurements, analysis and interpretation (SMORN-II) // *Ibid.* 1977. Vol. 1. P. 293–296.
30. **Türkcan E.** Review of Borssele PWR noise experiments analysis and instrumentation (SMORN-III) // *Ibid.* 1982. Vol. 9. P. 437.
31. **Türkcan E.** On-line monitoring of a PWR for plant surveillance by noise analysis (SMORN-IV) // *Ibid.* 1985. Vol. 15. P. 365.
32. **Trend monitoring and noise signal processing system for Borssele NPP /** E. Türkcan, A. Winkelman, J. Beesword, P. Stok // *Annual Meeting on Nuclear Technology*, May 2001, Dresden. Paper 606.

33. Barotou B., Türkcan E. Real time reactor noise diagnostics for the Borsjle (PWR) nuclear power plant (SMORN-VIII) // *Prog. Nucl. Energy* 2003. Vol. 43. N 1—4. P. 137—143.
34. Jinho Park, Jeong Han Lee, Tae-Ryong Kim. Identification of Reactor Internals Vibration Modes of a Korean Standard PWR Using Structural Modeling and Neutron Noise Analysis (SMORN VIII) // *Ibid* 2003. Vol. 43. N 1—4. P. 177—186.
35. Noise analysis experience of BWR power plant / Fukumishi, Izumi Kato Kobayashi // *Ibid*. 1977. Vol. 1. P. 73.
36. Nishihara H., Konishi H. A New correlation method for transit-time estimation // *Ibid*. P. 219.
37. Ando Y., Kanemoto S., Yamamoto F. Operating experience of a BWR plant diagnosis system // *Ibid*. 1982. Vol. 9. P. 657.
38. Oguma R. Coherence analysis of systems with feedback and its application to a BWR noise investigation // *Ibid*. 1982. Vol. 9. P. 137—148.
39. Tamaoki T., Kawano K., Sato M. On-line diagnosis algorithm based on noise analysis // *Ibid*. 1982. Vol. 9. P. 183.
40. Oguma R., Türkcan T. Application of an improved noise analysis method to investigation of PWR noise: signal transmission path analysis (SMORN-IV) // *Ibid*. 1985. Vol. 15. P. 863—873.
41. Uchiyama J., Skali K. A reactor equipment monitoring system for Japanese PWRs. // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VII*. June 19—23, 1995, Avignon, France. Session 7 — System feedback experience and new system development. Vol. 2. P. 7.6.
42. Saito K. On the theory of power reactor noise (I, II, III) // *Ann. Nucl. Sci. and Engrg.* 1974. Vol. 1. P. 31, P.107, P.209.
43. Saito K. A noise pattern library effort in Japan // *Prog. Nucl. Energy* 1977. Vol. 1. P. 713.
44. Murata F., Kato K., Tomizawa F. Development of diagnosis system for a boiling water reactor // *Nucl. Technology*. 1979. Vol. 44. P. 104—117.
45. Ito T., Kawai K., Hashimoto Y. BWR plant diagnosis system development // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* 1981. Vol. 39. P. 641.
46. Fujita Y., Oraki H. Neutron noise monitoring of reactor core PWR internal vibrations at PWR's in Japan // *Prog. Nucl. Energy*. 1982. Vol. 9. P. 531.
47. Nuclear power plant. PWR. Vibration monitoring of internal structures. Norme International Standard. CEI IEC 61502, 1999.
48. Use of noise diagnostics for WWER-440/ A. Grabner, G. Granwald, P. Liewers et al.: *Orbit* / Институт ядерных исследований, Германия, Потсдам, 1998.
49. Kanse U. Upgrade of a service and maintenance centre for diagnostic systems. Report Siemens AG/KWU, № ZKN541, 1996.
50. Detection of core barrel motion at WWER-440 type reactors (SMORN VI)

- / P. Schumann, P. Liewers, W. Schmitt, F. P. Weiss // *Prog. Nucl. Energy* 1988. Vol. 21. P. 89–93.
51. Schumann P. Zur abschätzung des Einflusses von relativen Regelelementbewegungen bei anomalen Reaktor-korbbewegungen // *Kernenergie*. 1990. Bd. 33. S. 223–227.
 52. Kanne U., Meyer K. In-core reactor noise measurements at PWRs of WWER type and their interpretation // *Prog. Nucl. Energy*. 1985. Vol. 15. P. 351–358.
 53. PC-based vibration monitoring in KOLA nuclear power plant system and commissioning results / R. Gelhausen, V. Reznik, S. Titov, H.-J. Wehling // *Proc. of 24th informal meeting on reactor noise*. June 23–25, 1993, Oybin.
 54. Kanne U., Bechold B. New generation of monitoring systems with on-line diagnostics // *Prog. Nucl. Energy*. 1995. Vol. 29. N 3–4. P. 215–227.
 55. Компоненты метода эксплуатационного мониторинга и неразрушающего контроля на атомных станциях. Материалы семинара Framatome ANP. 22–23 ноября 2002, Москва.
 56. Results of noise analysis in the WWER 440 type nuclear power plant Discovary (SMORN-VII) / J. Runkel, D. Stegemann, J. Fiedler et al. // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics*. June 19–23 1995, Avignon, France. P. 78–86.
 57. Vibration measurements in PWR Obrigheim by use of in-core accelerometers / E. Laggard, J. Fiedler, J. Runkel et al. // *Prog. Nucl. Energy*. 1995. V. 29. P. 113–119.
 58. Hrosse P., Maudry J., Korek J. Technical diagnostics of V1 and V2 NPP at Bohunice (SMORN-VII) // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics*. June 19–23, 1995, Avignon, France. P. 561–571.
 59. Kosaly G., Williams M.M.R. Point theory of the neutron noise induced by inlet temperature fluctuations to neutron noise // *Atomkern-Energie*. 1972. Bd 20. S. 33.
 60. Kosaly G., Maroti L., Mesko L. A Simple space dependent theory of the neutron noise in a BWR // *Ann. Nucl. Energy*. 1975. Vol. 2. P. 315.
 61. Kosaly G., Mesko L. Theory of the auto-spectrum of the local components of PWR // *Ibid.* 1976. Vol. 3. P. 233–238.
 62. Investigation of the two-phase flow in a boiling water reactor using neutron noise technique / G. Kosaly, L. Kostic, L. Minoff et al. // *Nucl. Engng and Design*. 1979. Vol. 52. P. 357–370.
 63. Kosaly G., Sanchez R. Calculations of the sensitivity volume of a BWR in-core detector above 2 Hz // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* 1982. Vol. 41. P. 620.
 64. Háló E., Siklóssy P., Tóth Z. Automated vibration monitoring system for WWER-440 nuclear power plant diagnostics and surveillance (SMORN-III) // *Prog. Nucl. Energy*. 1982. Vol. 9. P. 595–604.
 65. Katoya T., Koema R. Problems of estimation of the thermohydraulic param

- sters using neutron and temperature noise signals in PWR's (SMORN-IV) // *Ibid.* 1985. Vol. 15. P. 359–364.
66. Kasaly G., Wach D. Investigation in the void effect of local and global drying sources in incore neutron noise measurements // *Atomkern-Energie* 1974. Bd 23. Lfg. 1. S. 244.
67. Kasaly G., Kestle L., Milneff L. Investigation of the local component of the neutron noise in a BWR and it's application to the study of two-phase flow // *Prog. Nucl. Energy*. 1977. Vol. 1. P. 99.
68. Behringer K., Kasaly G., Kestle L. Theoretical investigation of the local and global components of the neutron noise field in a BWR // *Nucl. Sci. and Engng.* 1977. Vol. 63. P. 306.
69. Pazzi I. Investigation of the space dependent noise induced by a vibrating absorber // *Atomkern-Energie*. 1977. Bd 30. Lfg. 1. S. 29.
70. Valko J., Medko L. Experimental and numerical investigation of the local and global components of boiling noise // *Prog. Nucl. Energy*. 1977. Vol. 1. P. 265.
71. Kasaly G., Albrecht R.W., Gubin A. Theory of induced neutronic fluctuations to investigate two-phase flow thermal-hydraulics // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* 1981. Vol. 38. P. 643.
72. Fer G., Ius L., Medko L. Comments on practical application of autoregressive signal analysis to PWR NPP noise data (SMORN-IV) // *Prog. Nucl. Energy*. 1985. Vol. 15. P. 897–902.
73. Glocker O. Fault detection via sequential probability ratio test of multivariate autoregressive modeling based residual time series // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI. May 19–24, 1991. Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 10 – Sensor monitoring and signal validation methods. Vol. 2. P. 70.61.*
74. Fer G., Isak E., Valko J. Some results on noise measurements in a PWR NPP (SMORN-IV) // *Prog. Nucl. Energy*. 1985. Vol. 15. P. 387–393.
75. Aguilar O., Fer G. Monitoring temperature reactivity coefficient by noise method in a NPP at full power // *Ann. Nucl. Energy*. 1987. Vol. 14. P. 512.
76. Pag G., Jozsa I. Estimation of the temperature reactivity coefficient in operation nuclear power plant // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VII. June 19–23, 1993. Avignon, France. Session 8 – Reactor physical parameters estimation. Vol. 2. P. 8.4.*
77. Kasaly G. Noise investigation in BWR and PWR // *Prog. Nucl. Energy* 1980. Vol. 5. P. 145–159.
78. Valko J. *et al.* Experiences with noise analysis at PAKS nuclear power plant Progress in Nuclear Energy (SMORN-IV) // *Ibid.* 1985. Vol. 15. P. 403–412.
79. Fer G., Glocker O., Rindhardt U. Boiling detection in PWRs by noise measurement // *Ibid.* 1988. Vol. 21. P. 555.

80. Development and utilization of an automated reactor noise measuring and processing system / G. Por, S. Bende-Parkas, O. Glockler et al. // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI, May 19–24, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 – Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 18.01.
81. Por G., Sokolov L.A. KAZMER a complex noise diagnostic system for 1000 MWe PWR WWER type nuclear power units // Proc. TC meeting on utilization of condition monitoring, October 7–9, 1991, Vienna.
82. Valke J. In-core generation temperature fluctuations and boiling detection in pressurized, water reactors // Ann. Nucl. Energy. 1992. Vol. 19. N 3. P. 155–168.
83. Pargit L. Investigation of the space dependent noise induced by a vibrating absorber // Atomkern-Energie. 1977. Bd. 30. Lfg. 1. S. 29.
84. Por G., Katona T. Some aspects of the theory of neutron noise due to propagating disturbances (SMORN-III) // Prog. Nucl. Energy. 1982. Vol. 9. P. 209–216.
85. On-line diagnostic method for vibrational surveillance of PAKS NPP primary circuit equipment's / E. Hollo, P. Siklosy, L. Turi, S. Ratkai. // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI May 19–24, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 – Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 20.01.
86. Por G., Kantor L.P., Sokolov L. Experiences with a reactor noise diagnostics system for VVER-1000 MWe type russian reactors // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VII. June 19–23 1995, Avignon, France. Session 8 – Reactor physical parameters estimation. Vol. 1. P. 7.2.
87. Csibok T., Kiss G. Regular neutron noise diagnostics measurements at the Hungarian Paks NPP (SMORN-VIII) // Prog. Nucl. Energy. 2003. Vol. 43. N 1–4. P. 67–74.
88. Por G. Monitoring and diagnosis systems to improve NPP reliability and safety monitoring and diagnosis systems to improve nuclear power plant reliability and safety // Proc. of the specialists' meeting IAEA May 14–17 1996, Gloucester, UK. P. 33–39.
89. Jakš M. Monitoring and diagnostic system of NPP Temelin operational monitoring of primary circuit components // Regional Workshop IAEA 28–31 october 2003, Yozosua.
90. Keelowsky T., Lowenfeld S., Bauman D. Advanced plant information systems using intelligent monitoring and diagnostics and the ALLY. // Plant Monitoring and Diagnostics System, SMIRT Conference (Post Conference Seminar), 1995, Konstanz, Germany.

Общие методы выделения диагностической информации из реакторных шумов

3.1 Особенности шумового объекта

Шумы энергетического реактора представляют собой сложные взаимосвязанные явления нейтронной физики, теплогидравлики акустики и механики. Исследования по их интерпретации, интенсивно проводимые последние 30 лет, позволили создать мощный инструмент раннего определения технического состояния РУ, шумовую диагностику. Шумовая диагностика, а также шумовой контроль как измерение динамических характеристик РУ, основываются на пассивном мониторинге флуктуирующих составляющих нейтронного потока внутри и вне АКЗ и флуктуаций давления ТН. Совместное многоканальное измерение перечисленных флуктуаций с виброперемещениями (виброскоростями, виброускорениями) различных элементов конструкций РУ является измерительной базой СВЩД. Известны также случаи совместного измерения перечисленных выше сигналов с флуктуациями температуры ТН, вне- и внутризонных акустических и гамма-полей [1–5].

В практике анализа реакторных шумов выработался некоторый стереотип интерпретации особенностей вероятностных характеристик. В первую очередь обрабатываются резонансы спектральных характеристик, линейные участки фазы ВСПМ, абсциссы экстремума ВКФ, частотные диапазоны высокой когерентности. Недавно показана эффективность методов многомерного анализа МАР-модели (многомерные авторегрессионные) и методы частотной и множественной когерентности [6–9].

Трудность состоит в том, что одна и та же особенность может быть обусловлена разными физическими источниками. Например, существует множество причин, по которым один сигнал запаздывает по отношению к другому, что отражается в виде сдвига экстремума их ВКФ и/или линейной фазы их ВСПМ. Из за

падения извлекаются кинетические параметры активной зоны, теплофизические константы, скорость теплоносителя, температурный коэффициент реактивности и т.п. Резонансы спектральных характеристик сопровождают различные эффекты вибраций, кипение ТН, взаимодействие нескольких шумовых источников и т.п.

Успешное функционирование СВШД обеспечивается не только аппаратно-программными средствами, которые сами по себе являются наукоемкими изделиями, но и их методико-алгоритмическим наполнением. Другими словами, необходимо уметь интерпретировать на физическом уровне все или, по крайней мере, все относящиеся к диагностированию основные особенности вероятностных характеристик регистрируемых шумов. Такие знания получают и расчетным путем, и экспериментальным моделированием на стендах, и длительным экспериментированием на самом объекте.

Недостаток априорных сведений может быть отчасти выполнен исследованиями многоканальных реализаций реакторных шумов разных физических полей (нейтронного, акустического, температурного и т.п.). Если гипотеза о происхождении некоторой спектральной особенности подтверждается характерным видом других авто- взаимных и многомерных оценок по разным физическим полям, то ее можно считать правдоподобной.

В зависимости от физической природы регистрируемого шумового поля и параметров детектора этого поля (частотный диапазон, пространственная область чувствительности датчика, его динамический диапазон), от физики неисправности и от свойств самого объекта (его спектрального образа сигналов, характеризующих исправное состояние), наследуют ту или иную особенность спектральной характеристики. Чаще всего такой особенностью является резонанс. Другой класс признаков неисправностей связан с появлением новых особенностей, которых ранее у спектрального образа исправного объекта не наблюдалось: боковые полосы вокруг известного резонанса (признак появления нелинейных эффектов), гармоники и субгармоники известного резонанса (удары, изменение характеристик возбуждающих систему сил) или просто новые спектральные линии.

Для реакторных шумов характерна еще одна форма спектраль-

ных особенностей — так называемые *zink*-структуры, которые представляют собой эквидистантное чередование максимумов и минимумов по оси частот. В аналитическом виде *zink*-структуры чаще всего описываются функциями типа $|\sin \pi a f|$, $|\sin \pi a f|/\pi a f$ ($|\sin \pi a f|/\pi a f$)², где в параметре a может быть заложена информация о виброустойчивости, об аномальном возбуждении теплоносителя, о кинетических параметрах активной зоны, о гидродинамических параметрах первого контура и т.п.

Широкий класс неисправностей связан с нерезонансными изменениями спектральных характеристик. Например, медленные ресурсные изменения объекта (так называемые процессы старения) чаще всего приводят к изменению общей дисперсии шумов.

Среди спектральных особенностей сигналов датчиков абсолютных и относительных перемещений, датчиков пульсирующего давления и акселерометров можно выделить четыре класса резонансов: собственные частоты вибраций элементов конструкции; резонансы стоячих волн давления теплоносителя; резонансные частоты возбуждающих сил; нелинейные резонансные явления (например, гармоники и субгармоники частоты вращения ГЦН или комбинационные частоты).

Каждая из этих характеристик является диагностическим признаком в системах виброконтроля. Большой чувствительностью к аномалиям и лучшей помехоустойчивостью обладают взаимные и многомерные спектральные характеристики шумов.

Статистическая неизменность шумовых образов в течение кампании является признаком того, что ресурс оборудования еще не выработан. Это свойство как диагностический признак используется в системах сигнатурной шумовой диагностики.

В практическом смысле важны следующие этапы получения диагностической информации. На первом этапе важно распознать спящие физические источники (причины появления) спектральных особенностей наблюдаемых шумовых сигналов. На втором — найти их локализацию, т.е. определить, принадлежит ли данный резонанс какому-либо конкретному элементу (узлу, блоку) объекта или является общеобъектным явлением. На третьем — исследовать взаимовлияние элементов объекта на частоте резонанса. На четвертом — прокалибровать данную спектральную особенность, т.е. связать какие-либо ее параметры с численными ха-

характеристиками данного физического явления. Например, связать размах колебаний элемента в микрометрах с амплитудой резонанса в единицах АСПМ ($\Gamma\mu^{-2}$). И на последнем, пятом этапе, следует найти такие пороговые значения численных характеристик резонанса, выход за которые в перспективе угрожает работоспособности объекта. И, что существенно, данный порог должен способствовать выявлению неисправности на самой ранней стадии ее зарождения.

3.2 Роль феноменологических моделей

В 70-х годах появляются обзоры [10–14], обобщающие первый опыт работ по шумам энергетического реактора. В обзоре [11] сформулированы цели шумового анализа, обращается внимание на их прикладной характер, подчеркивается зависимость их от типа реактора и сложность интерпретации экспериментальных данных. В обширном обзоре [15] источники шумов классифицируют на ядерные, тепловые, гидродинамические и структурные. Обсуждая различные аналитические шумовые модели РУ, Сайто приходит к выводу, что «полное описание кинетического и пространственного шума будет трудновыполнимой задачей» [16]. Это мнение обсуждалось на конференциях по реакторным шумам [17–19], в обзорах [18, 20], а на конференции SMORN-VII оно прозвучало в пленарных докладах [21, 22].

Таким образом, по единодушному признанию специалистов состоявшая нейтронно-шумовая теория энергетического реактора еще не достигла такого уровня, который обеспечивал бы возможность расчетным путем достичь целей диагностики. Вероятностные характеристики шумов энергетического реактора неодинаковы для различных АкЗ, а картины шумовых полей для конкретной АкЗ зависят от многих факторов, как детерминированных (например, режимных параметров реактора), так и случайных (на пример, технологических разбросов при изготовлении элементов оборудования РУ). Поэтому конечная цель исследований — выработка диагностических методов — достигается экспериментальным подходом построением так называемых феноменологических моделей, в основе которых лежат экспериментальные зависимости

В вышедшем в 1980 г. обзоре Кошан [23] рассмотрены уже только феноменологические модели, которые в перспективе могут быть применимы на практике. Отмечается, что большинство опубликованных работ посвящены нейтронному шуму, отражая тем самым несомненно значимость этого информационного канала.

Первые успешные приложения нейтронно-шумовых исследований связаны с мониторингом паровой фазы в реакторах с кипящей водой BWR [24–27]. Несмотря на специфические свойства его теплоносителя, именно эти приложения определяли развитие нейтронно-шумовых методов и в реакторах других типов. Для НШ BWR разработана хорошо согласованная с экспериментом так называемая « $G-L$ » феноменологическая теория (теория глобальности-локальности), смысл которой сводится к следующему. НШ BWR состоит из двух частотно разнесенных составляющих

$$\delta\Phi(\omega, z) = \delta\Phi_G(\omega) + \delta\Phi_L(\omega, z)$$

где Φ — нейтронный поток; ω — частота; z — координата по высоте; G, L — глобальный и локальный компонент НШ соответственно.

Глобальный, пространственно независимый компонент G в НЧ-диапазоне определяется точечной кинетикой реактора, т.е. одинаково воздействует на все детекторы нейтронного потока, а локальный компонент L в ВЧ-диапазоне обусловлен исключительно флуктуирующим объемом паровой фазы и АхЗ — ба, которые превосходит по своей мощности все прочие источники НШ BWR. Флуктуации ба транспортируются вверх по каналу вместе с теплоносителем, их можно зарегистрировать только в пространственной области прямой «видимости» нейтронного датчика:

$$\frac{\delta\Phi_L(\omega, z)}{\Phi(z)} \sim \text{const} \int_0^{z+L} \delta\phi(\omega, x) dx$$

где L — длина чувствительности детектора в одномерной аксиальной модели, много меньше высоты активной зоны.

$G-L$ -теория дает возможность оценить долю паровой фазы

в АкЗ, скорость пароводяной смеси, распределение паровой фазы по высоте канала, т.е. все, что требуется для мониторинга АкЗ $G-L$ -теория создана коллективным трудом

в ранних работах Тай [28–29] формулируется собственно идея на качественном уровне;

на SMORN I она прозвучала в докладе [30],

начиная с конференции SMORN-II $G-L$ -теория стала общепринятой.

Прямое экспериментальное доказательство существования локального и глобального членов в разложении НШ было получено в [31] введением кратковременного импульса пузыря в АкЗ критического реактора.

Авторы исследований [32, 33] утверждают, что картины НШ в реакторах с водой под давлением (PWR, ВВЭР) гораздо сложнее чем в BWR, интерпретация спектральных характеристик шумов PWR какдым раз требует индивидуального подхода. После успеха $G-L$ теории нейтронного шума реакторов с кипящей водой были предприняты многократные попытки разработать нечто подобное и для реакторов с водой под давлением. Однако автоматически переносить $G-L$ теорию на PWR или ВВЭР нельзя в силу того, что в них может и не быть такого доминирующего источника нейтронного шума каковым является паровая фаза ТН в BWR. Кроме того, в PWR множество конкурирующих по мощности источников находятся в одном частотном диапазоне. В качестве характерных спектральных особенностей в PWR использовали link -структуры и линейные фазы ВСПМ между различными парами сигналов (ДПЗ1–ДПЗ2, ИК–ДПЗ, ДПЗ–ТП, ИК–ТП)

Действуя по аналогии с $G-L$ -теорией, некоторые авторы связывают link -структуры со скоростью теплоносителя, доказывая, что они (link -структуры) расположены в точках k/τ_0 , ($k = 1, 2, 3, \dots$), где τ_0 – время прохода теплоносителем активной зоны, другие – со скоростью паровой фазы при недогретом кипении ТН. Однако неоспоримая особенность link -структур от одного канала активной зоны к другому, огромное их число, а также наблюдаемые в эксперименте различные фазовые сдвиги в разных диапазонах частот между сигналами внутриреакторного контроля (ВРК), свидетельствуют о том, что простые модели здесь несостоятельны. Сложность пространственно-зависимых нейтронно-температур-

ных моделей ВКЭР не позволяет получить конечный результат в замкнутом аналитическом виде.

В экспериментальных исследованиях не всегда точно известно местоположение основной гармоник (собственной частоты) какой-либо вибрирующей конструкции на оси частот ω . В работах [34—36] отмечается зависимость ω_0 от расхода ТН, а в случае вибраций поглощающих стержней — от величины их погружения в АкЗ [37, 38]. Также наблюдалось уменьшение ω_0 ТВС в течение топливного цикла [36, 39]. Связать экспериментально полученные параметры резонанса с вибрацией какого-либо элемента АкЗ — задача не простая из-за наличия большого числа таких элементов, перекрытия их характерных частотных диапазонов, возможности возникновения сложных колебательных мод. Эти трудности преодолевают, используя следующий комплекс мер

— стендовые и расчетное моделирование [40—44];

— измерения при различных значениях режимных параметров [45, 46] и большом числе детекторов [47—49];

— проведение исследований на нескольких реакторах одного типа [50—52],

— поиск взаимосвязей между НШ и шумами иным физическим образом [53—55]

3.3 Методы сигнатурной диагностики

Виброшумовая диагностика совершается по большому числу физических полей, диагностируются различные неисправности различных компонентов оборудования в различных частотных диапазонах, и, тем не менее, принципы измерения флуктуаций и методы их математической обработки обладают некоторой универсальностью. Это, несомненно, должно отразиться на концепции аппаратного и математического обеспечения СВШД. Как следует из предыдущих разделов, в основе обработки реакторных шумов лежат методы анализа временных рядов, а главным инструментом является спектрально-корреляционный анализ.

Таким образом, СВШД в части математической обработки может базироваться на универсальных программных пакетах по обработке временных рядов, хотя это и неэффективно. Так раньше строились исследовательские СВШД, состоявшие, например, из

аппаратной части с функциями многоканального магнитофона и компьютерной части с известными универсальными пакетами программ обработки случайных процессов (MathLab, StatGraf, StatLab, StatPack, SPSS и т.п.). Далее, после анализа традиционных вероятностных характеристик (АКФ, ВКФ, АСПМ, ВСПМ, функций когерентности и т.п.), над ними могут быть настроены диагностические процедуры, которые, как правило, по числу арифметических операций гораздо экономнее чем перечисленные выше оценки.

Например, в основе систем сигнатурной диагностики лежат методы распознавания образов. В качестве меры отличия исследуемого образа от заранее оцененного эталона используются расстояние Махаланобиса, корреляционные невязки, квадратичные критерии (метод потенциальных функций) и т.п. Сами же эталоны строятся на каких-либо устойчивых вероятностных характеристиках шумов (функция плотности распределения, АСПМ, ВСПМ, функция когерентности и т.п. или даже числовые характеристики случайных процессов: дисперсия или высшие моменты распределения). Однако чаще всего применяют именно спектральные характеристики.

Системы сигнатурной диагностики строятся на следующих формальных принципах:

- шумовой образ является эталоном (сигатурой) исправного состояния (нормы), который каждый раз воспроизводится при достижении данного стационарного состояния, определяемого фиксированным множеством режимных параметров реактора (мощности, расхода давления и т.п.);

- воспроизводство шумовых образов во времени свидетельствует об исправном состоянии реактора;

- несовпадение какого-либо текущего шумового образа с заранее оцененным шумовым эталоном свидетельствует о наличии неисправности;

- изменение шумового образа вследствие появления и развития неисправности происходит намного раньше изменения детерминированных режимных параметров.

Типичными статистиками сравнения эталонных СПМ — $G_e(f)$ с наблюдаемой в данный момент (текущей) СПМ $G_y(f)$ являются так называемые статистики Пьетти, представленные на конфе

$$\ln \left| \sum G_C(f) / \sum G_S(f) \right| < \varepsilon_1$$

$$\sum \ln^2 \left(G_C(f) / G_S(f) \right) < \varepsilon_2$$

$$\ln \left(G_C(f) / G_S(f) \right) < \varepsilon_3$$

где ε_1 , ε_2 , $\varepsilon_3(f)$ — пороги.

Очевидно, что перечисленные выше статистики (3.1) тождественно равны нулю при точном совпадении текущего спектра с эталонным. При возникновении неисправности, которая проявляется в некотором отклонении от эталона, ε_1 , ε_2 , $\varepsilon_3(f)$ — значимо отличны от нуля. Статистические свойства выражений (3.1) хорошо исследованы, все они имеют асимптотически нормальные распределения, т. е. по ним заранее могут быть выставлены пороги.

Описанные статистики универсальны в том смысле, что не требуют описания характеристик регистрируемого шумового поля и построены на непараметрических критериях. Оптимальность их (в смысле минимизации времени обнаружения аномалии) сомнительна, что следует из факта их непараметричности, но, тем не менее, они вполне приемлемы для практических приложений. Алгоритмы Пнети получили распространение в нескольких исследовательских системах шумовой диагностики разных стран и подтвердили свою работоспособность при имитации большого числа неисправностей [57]. Более того, они оказались «избыточно чувствительными» в том смысле, что обнаруживали невоспроизводимость спектральных образов во времени при том, что исправная РУ работала в стационарном режиме. Такие события в теории обнаружения тракуются как ложные тревоги. В приложениях к диагностике РУ это означает, что еще не сформированы понятия эталонных шумовых портретов со соответствующих исправно функционирующему объекту.

Обработка многоканальных шумовых реализаций, очевидно, должна сжимать информацию. Переход от реализаций к спектральным характеристикам можно понимать именно как способ такого сжатия, а критерий согласия спектральных характеристик — как следующий этап сжатия. В результате диагностическая

информация, распределенная по многим шумовым каналам и многим диапазонам частот, будет сжата до бинарной альтернативы: есть или нет изменения во времени шумовых образов.

Критерии согласия могут быть построены не только по автоспектральным, но и по взаимным спектральным характеристикам шумов. Взаимные спектральные характеристики значительно расширяют круг выявляемых аномалий, так как обладают большей помехоустойчивостью и большей избирательностью, чем автохарактеристики. Мониторинг различных мод колебаний корпуса реактора, шахты АкЗ ВКУ осуществляется по функциям когерентности и фазам ВСПМ. Мониторинг расхода теплоносителя в технологических каналах и обнаружение кипения ТН также осуществляется по взаимным характеристикам.

Важнейшими из взаимных характеристик и наиболее употребительными в реакторно-шумовой диагностике являются функция когерентности и фаза ВСПМ. Интерпретацию каких-либо взаимных спектральных особенностей осуществляют только их совместным анализом, так как функция когерентности определяет точностные параметры оценки фазы. Для применения их в качестве эталонных спектральных характеристик в [58] были разработаны критерий согласия по функции когерентности и интегральный критерий согласия по фазе:

$$\epsilon_c = \sqrt{\frac{k}{2}} \ln \left\{ \frac{n}{4k} \sum_{i=1}^k \ln \left[\frac{1 + \sqrt{\Gamma_S(f_i)}}{1 - \sqrt{\Gamma_S(f_i)}} \right] \frac{1 - \sqrt{\Gamma_C(f_i)}}{1 + \sqrt{\Gamma_C(f_i)}} \right\} \quad (3.2)$$

$$\epsilon_\varphi = \sqrt{\frac{k}{2}} \ln \left\{ \frac{\pi \Gamma}{k(1 - \Gamma)} \sum_{i=1}^k [\Phi_S(f_i) - \Phi_C(f_i)]^2 \right\} \quad (3.3)$$

где k — число дискретных спектральных составляющих; n — число усреднений периодограмм при получении спектральной характеристики; $\Gamma_S(f_i)$, $\Gamma_C(f_i)$ — текущая и эталонная функция когерентности соответственно; Φ_S , Φ_C — текущая и эталонная фаза ВСПМ соответственно.

Таким образом, для реализации данных критериев помимо оценок эталонной и текущей функций когерентности необходимо задавать число усреднений периодограммы n , известное из параме-

тров оценивания этих функций — число дискретных частот в заданном диапазоне k .

Статистики (3.2, 3.3) построены таким образом, что, если никаких изменений в объекте диагностирования не произошло, и текущий спектральный образ с точностью до единичных флуктуаций совпадает с эталонным спектральным образом, то (3.2, 3.3) — случайные величины с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Эксперт может назначить порог в абсолютных единицах априори, без процедуры обучения, уже не задумываясь о том, в каких условиях получены оценки эталонной и текущей функции когерентности. Так, порог, равный пяти СКЗ, практически гарантирует отсутствие случайных выбросов (ложных тревог).

Описанные критерии пригодны для анализа диапазона частот в котором может находиться несколько спектральных особенностей. Все дискретные составляющие этого диапазона уравнены по отношению друг к другу в смысле равенства их первых двух моментов распределения. Если же рассогласование текущей спектральной характеристики с эталонной происходит на единственной частоте, то все остальные неизменные спектральные составляющие играют роль шумящего фона. Чем их больше, тем менее возмущается результирующая статистика из-за возникновения неисправности. В то же время существуют точечные особенности фазы ВСПМ соответствующие 0 и π , прочие всего интерпретируемые на физическом уровне. Например по противофазам сигналов специально подобранных детекторов в определенных диапазонах частот выявляются мантийные и оболочечные колебания пласты активной зоны. Противофазные и синфазные компоненты — атрибут стоячих волн давления теплоносителя в первом контуре, напротив, их отсутствие — признак бегущей волны; нулевая фаза характеризует вертикальные колебания корпуса реактора, она же является признаком глобальности источника для нейтронных шумов и т.п. Построенный без частотных усреднений критерий согласия, проверяющий воспроизводимость только этих значений фаз, более чувствителен, чем интегральный критерий согласия, представленный формулой (3.3). Точечный критерий согласия фаз имеет вид [58]

$$\delta_p = \sqrt{n\Gamma/(1-\Gamma)} (\Phi\Phi_C - \Phi\Phi) \quad (3.4)$$

По объему требуемых априорных сведений системы сигнатурной диагностики более, чем какие-либо другие системы шумовой диагностики, приспособлены для практических приложений. Во-первых, все они основаны на формальных методах, большинство которых заранее позволяют выставить пороги, во-вторых, большинство этих методов — методы распознавания с обучением, что позволяет избежать априорной неопределенности на этапе обучения.

Изначальное отсутствие физической основы для диагностики сводит сигнатурный подход лишь к индикации наличия неисправности (хотя и на ранней стадии). Если система предварительно не обучена распознаванию вполне конкретных аномалий (если нет эталонов не-нормы), то выход на диагноз с указанием причины возникновения неисправности практически невозможен.

Следует особо подчеркнуть, что шумовая диагностика, обладая высочайшей чувствительностью к аномалиям, способна обнаруживать неисправности на самых ранних стадиях их зарождения. Для существующих систем контроля РУ эти аномалии находятся вне «области видимости». Оператору РУ необязательно мгновенно реагировать на факт их обнаружения. Результаты работы СВЩД представляются не оператору РУ, а диагностическому персоналу. Ранние признаки зарождающейся неисправности еще не угрожают работоспособности РУ. Однако важно следить за их динамикой и за накоплением их числа с тем, чтобы не пропустить момента качественного перехода в «крупное» аномальное событие, которое повлечет за собой изменения и штатно контролируемых параметров. Таким образом, шумовой мониторинг в перспективе может перерасти в самый ранний барьер безопасности.

3.4 Аналитические методы шумовой диагностики

Другое направление, которое будем далее называть шумовой диагностикой на физическом уровне, основано на аналитическом описании шумовых образов или, по крайней мере, на аналитическом описании доминирующих источников. Такой подход позволяет представить шумовой образ в терминах физических параметров, чаще всего штатно не измеряемых (коэффициенты реактивности, тепломеханические параметры АхЗ и отдельных участков контуров, характерные частоты вибраций внутрикорпусных

элементов, моды колебаний корпуса реактора и т. п.). Их непрерывная оценка по шумовым каналам расширяет наблюдаемость объекта и несет информацию не только о факте зарождения неисправности, но и о ее локализации и причинах возникновения.

Диагностирование РУ с помощью динамических или шумовых (как обобщение динамических) моделей предполагает высокий уровень аналитического освоения объекта диагностирования. Этим моделям необходимо придать свойство аналитических эталонов, с которыми в любой момент времени можно сравнить любое (в том числе и аварийное) текущее состояние объекта. В этом отношении развитие динамических моделей явно страдает незавершенностью.

Действительно, на стадии расчёта и конструирования реактора, до экспериментальных проверок его отдельных элементов, когда модели являются основным инструментом исследований эталонный уровень еще не достигнут. Возможность адаптации модели под объект существует только на функционирующей РУ. Однако на этой стадии потребности эксплуатации в моделях сводятся, в лучшем случае, к разработке трензюров.

В основе аналитических шумовых моделей РУ лежат детерминированные модели динамики РУ. По существу, производится стохастическое обобщение последних так, чтобы в частном случае вырождения шумовых компонент получались исходная детерминированная модель динамики. В силу ничтожности шумовых возмущений по отношению к среднему значению параметра чаще всего допустимо пренебрежение нелинейными эффектами.

Наиболее распространенный способ перехода от детерминированной модели

$$L[X(z, t)] = A \quad (3.5)$$

к стохастической состоит в представлении вектора переменных X в виде суммы детерминированной и случайной составляющих

$$X(z, t) = X_0(z, t) + \delta X(z, t) \quad (3.6)$$

где $L[\dots]$ — дифференциальный оператор системы; A — вектор физических параметров, определяющих работоспособность объекта; $\delta X(z, t)$ — вектор случайных вариаций

На этом этапе возможно пренебрежение пространственной зависимостью флуктуации, когда они имеют глобальный характер

$$X(z, t) = X_0(z, t) + \delta X(t) \quad (3.7)$$

Исходная модель (3.5) после подстановки выражения (3.6) преобразуется в две системы в результате раздельного приравнивания детерминированной и случайной частей:

$$L[X_0(z, t) - A] = 0 \quad (3.8)$$

$$L[\delta X(z, t) - A] = 0 \quad (3.9)$$

Стохастическая система (3.9) линеаризуется, т.е. исключаются члены второго и более высоких порядков малости (например, вида $\delta X_1 \cdot \delta X_2$), и Фурье-оператором $F[\dots]$ переводится в частотную область

$$F\{L[\delta X(z, t) - A]\} = L_F[\delta X(z, t) - A] = 0 \quad (3.10)$$

где $L_F[\dots]$ — полиномиальный оператор в частотной области.

К решению полученной системы применяют тот или иной усредняющий оператор $\langle \dots \rangle$. Чаще всего с его помощью вычисляют взаимную спектральную плотность мощностей $G_{ij}(z, f, A)$ между компонентами вектора

$$\begin{aligned} \delta X(z, f, A) &= \{\delta X_1(z, f, A) \quad \delta X_2(z, f, A) \quad \dots \quad \delta X_n(z, f, A)\} \\ G_{ij}(z, f, A) &= \langle \delta X_i(z, f, A) \delta X_j^*(z, f, A) \rangle \end{aligned} \quad (3.11)$$

где * — знак комплексного сопряжения, или, в частности, при $X = X$ — автоспектральную плотность мощностей $G_{ii}(z, f, A)$

$$G_{ii}(z, f, A) = \langle |\delta X_i(z, f, A)|^2 \rangle \quad (3.12)$$

или взаимную корреляционную функцию $K_{ij}(t, z, A)$

$$K_{ij}(t, z, A) = F^{-1}\{G_{ij}(z, f, A)\} \quad (3.13)$$

или в качестве автокорреляционной функции $K_{ii}(t, \tau; A)$

$$K_{ii}(t, \tau; A) = F^{-1}[G_{ii}(z, f; A)] \quad (3.14)$$

где $F^{-1}[\dots]$ — оператор обратного Фурье-преобразования.

Таким образом, осуществляется переход к вероятностным характеристикам, с помощью которых могут быть найдены компоненты вектора A .

Если между детерминированными процессами $X_i(t)$, $X_j(t)$ существует связь, выражаемая через импульсную характеристику $H_{ij}(t)$ (или в частотной области — через передаточную функцию $W_{ij}(f)$) она может быть найдена и из шумовых сигналов δX_i , δX_j через АСПМ и ВСПМ:

$$W_{ij}(f) = G_{ij}(f)/G_{ii}(f) \quad (3.15)$$

Таким образом, шум — это динамика «в малом». В эксперименте по паре случайных процессов, полученных с детекторов, установленных в точках z_1 и z_2 , $\delta X(t, z_1)$, $\delta Y(t, z_2)$ и связанных передаточной функцией $W'_{ij}(f, z_1, z_2, \vec{A})$, может быть идентифицирован вектор параметров A , компоненты которого имеют вполне определенный физический смысл. В многомерном пространстве параметров A может быть определена область допустимых (рабочих) значений, выход за пределы которой свидетельствует о наличии неисправности, а сами аномальные значения параметров A — о характере неисправности.

В идеале передаточные функции должны быть получены из статистического обобщения аналитических моделей динамики. На стадии перехода от сигнатурной диагностики к физической возможен также и аппроксимативный подход, когда аналитический вид объекта задан, исходя из эмпирических соображений.

Важным аспектом и динамических, и шумовых исследований является определение свойств объекта по совместному анализу возмущения и реакции на него во временной или частотной области. Если в первом случае возмущения специальным образом организованы, известны момент их начала и область приложения — они нацелены на выделение одного или малого числа интересующих эффектов — то в случае шумового анализа возмущения —

такими отсутствуют (свойство пассивности шумового анализа). Их роль выполняют естественные флуктуации параметров объекта. Это свойство, несомненно, является положительным, так как позволяет производить диагностирование в эксплуатационных условиях без возмущения реактора. В то же время вследствие пассивности анализа существуют и определенные трудности. Шумовые возмущения, как правило, пространственно распределены и всегда перемешаны с паразитными флуктуациями. Если в динамических исследованиях причинно-следственные связи выявляются по известному моменту начала воздействия и анализу запаздывающей реакции, то шумовые входные и выходные процессы протекают одновременно. Из-за этого в шумовых исследованиях не всегда удается установить отношения «вход—выход».

Еще одним отличием шумового анализа от динамического детерминированного является диапазон исследуемых частот. Как правило, динамические исследования РУ «низкочастотнее» шумовых. Это обусловлено и невозможностью введения быстрых возмущений в объект штатными органами управления и инерционностью штатных детекторов. Следует отметить, что и многие достижения шумового анализа реализуемы на практике только лишь с внедрением в штатное оборудование новых быстродействующих детекторов.

Шумовые модели как обобщения динамических моделей, очевидно, сложнее последних. А полномасштабные динамические модели РУ, включающие в себя пространственные уравнения нестационарной кинетики тепло- и гидродинамики не имеют решений в замкнутом аналитическом виде и решаются численно. В этой связи значительный интерес вызывают те упрощенные шумовые модели, которые, во-первых, способны предсказывать доминирующие источники в заданной полосе частот, во-вторых имеют аналитически замкнутое решение или аналитически замкнутую асимптотику решения. Таким образом, родство динамических детерминированных и шумовых процессов позволяет надеяться на шумовой анализ как на потенциальный источник динамической информации о РУ (в том числе и информации о несправностях).

Гораздо хуже обстоят дела с эталонностью шумовой диагностики. По существу, адекватных шумовых аналитических моделей

интерпретирующих на физическом уровне хотя бы отдельные особенности наблюдаемых шумовых характеристик, нет ни у одного из эксплуатируемых типов реакторов, не говоря уже о проектируемых реакторах. Очевидно, что на этапе пуска голавного образца новой РУ следует уделить большое внимание отстройке систем диагностики. Естественно, что к этому времени должна быть завершена основная работа по их созданию.

Наиболее близки к шумовым моделям модели устойчивости стационарного состояния реактора. Они, как правило, линейные, т.е. справедливые для малых отклонений параметров, а взаимосвязи между различными процессами представляются чаще всего в частотной области в виде передаточных функций. Априорный анализ устойчивости стационарного состояния реактора дает характерные частоты или диапазоны частот, на которых можно ожидать наличие резонансов в спектральных характеристиках шумов, но не дает аналитического вида этих характеристик.

Устойчивость, являясь внутренним свойством объекта, не зависит от возбуждающих объект воздействий, а шумовые образы в любой точке реактора представляют собой результат прохождения через соответствующие передаточные звенья некоторых входных шумовых воздействий. Иными словами, для получения аналитического вида какого-либо шумового образа мало знать передаточные свойства отдельных элементов объекта, которые поставляются анализом устойчивости, необходимо полное знание входных шумовых воздействий (их число, спектральный состав, места приложений, если они точечные, или их пространственное распределение в противном случае).

3.5 Открытые и закрытые схемы динамики

Полные схемы динамики АКЗ РУ можно представить в виде так называемых закрытых систем. Это означает, что выходной процесс любого элемента схемы динамики одновременно является входным процессом для другого элемента схемы. Атрибутом закрытой схемы является наличие в ней, по крайней мере, одного контура обратной связи. Чтобы в таких системах существовали флуктуации параметров (что наблюдается на практике), необходимо ввести извне один или несколько возбуждающих систему

шумовых источников. Как правило, предполагается их независимость друг от друга. В противном случае взаимосвязи между источниками шумов могут быть внесены в схему динамики, а несколько взаимосвязанных источников заменены одним эквивалентным.

Однако на практике при аналитическом описании шумовых процессов доминируют открытые системы. Они также содержат обратные связи, но некоторые из шумовых процессов назначаются входными возмущениями, некоторые — внутренними, остальные — выходными. Входные процессы не могут происходить от каких-либо сигналов изучаемого объекта, выходные — не могут каким-либо образом воздействовать на объект. В открытых системах необязательно наличие независимых источников шумов. Флуктуации параметров будут обусловлены уже только тем, что система возбуждается входными флуктуациями.

Для АКЗ ВВЭР с принудительной циркуляцией типичными входными процессами являются флуктуации температуры ТН на входе в АКЗ $\delta T_{\text{в}}(\omega)$, флуктуации расхода ТН на входе в АКЗ $\delta Q_{\text{в}}(\omega)$, глобальные флуктуации нейтронной мощности $\delta N(\omega)$. Типичными выходными процессами являются флуктуации температуры ТН по высоте АКЗ $\delta T_{\text{с}}(z, \omega)$ и флуктуации температуры топлива по высоте АКЗ $\delta T_{\text{т}}(z, \omega)$.

Приложительность такого формализма состоит в том, что пространственно-распределенный объект — активная зона — возбуждается точечными входными процессами, а зависимость от z выходных процессов обусловлена пространственно-зависимыми передаточными функциями типа $W_{T_{\text{с}}T_{\text{в}}}(z, \omega)$, $W_{T_{\text{с}}Q_{\text{в}}}(z, \omega)$, $W_{T_{\text{с}}N}(z, \omega)$.

Теоретически существует связь между входами и выходами, что опять-таки приводит открытую систему к закрытой, но пренебрежение ими возможно в определенных диапазонах частот. Так, пренебрегают влиянием выходной температуры ТН на входную из-за большого времени прохода ТН внешнего по отношению к АКЗ участка ГЦК при достаточно высокочастотном диапазоне. Возможно, что каждому исследуемому диапазону частот будет соответствовать своя схема динамики.

3.6 Системы, необходимые для оценки передаточных функций

В тривиальном случае системы с одним входом δx и одним выходом δy передаточная функция $W_{yx}(\omega)$ вычисляется из оценок взаимной спектральной плотности мощности $G_{xy}(\omega)$ и одной из автоспектральных плотностей мощности $G_x(\omega)$ или $G_y(\omega)$ (рис. 3.1)



Рис. 3.1. Система с одним входом и одним выходом

Из очевидной взаимосвязи

$$\delta x(\omega) W_{yx}(\omega) = \delta y(\omega) \quad (3.16)$$

после умножения обеих частей уравнения на комплексно сопряженную переменную δx^* и усреднения имеем

$$\langle \delta x \delta x^* \rangle W_{yx} = \langle \delta y \delta x \rangle \quad (3.17)$$

$$G_x(\omega) W_{yx}(\omega) = G_{xy}(\omega)$$

$$W_{yx}(\omega) = \frac{G_{xy}(\omega)}{G_x(\omega)} \quad (3.18)$$

где в числителе — ВСПМ входного и выходного процессов, а в знаменателе — АСПМ входного процесса.

Действуя аналогично для процесса δy получаем

$$\langle \delta x \delta y \rangle W_{yx} = \langle \delta y \delta y \rangle$$

$$G_{xy}(\omega) W_{yx}(\omega) = G_y(\omega)$$

$$W_{yx}(\omega) = \frac{G_y(\omega)}{G_{xy}(\omega)} \quad (3.19)$$

Модуль передаточной функции можно получить как из выражений (3.18), (3.19), так и из оценок только АСПМ $G_x(\omega)$, $G_y(\omega)$. Умножая выражение (3.16) на комплексно-сопряженное уравнение и усредняя

$$\langle \delta x \delta x^* \rangle W^* W = \langle \delta y \delta y^* \rangle$$

получаем

$$|W_{yx}| = \sqrt{\frac{G_y}{G_x}} \quad (3.20)$$



Рис. 3.2 Система с обратной связью

Если исследуемая система имеет обратную связь (рис. 3.2), по двум из измеряемых процессам δx и δy оценить функции $W'_{yx}(\omega)$ и $W'_{xy}(\omega)$ нельзя

$$\begin{aligned} \delta u &= \delta x + \delta v \\ \delta y &= \delta u W'_{yu} \\ \delta v &= \delta y W'_{yx} \end{aligned}$$

Исключая внутренние переменные δu и δv , имеем выражение для передаточной функции от сигнала δx к δy :

$$\begin{aligned} \delta y &= (\delta x + \delta y W'_{yx}) W'_{yu} \\ W'_{yx} &= \frac{\delta y}{\delta x} = \frac{W'_{yu}}{1 - W'_{yx} W'_{yu}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Достаточно еще одной точки измерения (δu или δv) чтобы в совокупности с процессами δx и δy , извлечь из эксперимента и W'_{yx} и W'_{xy} :

$$\begin{aligned} W'_{xy} &= \frac{G_{yx}}{G_y}; \\ W'_{yx} &= \frac{1}{W'_{xy}} = \frac{1}{W'_{xy}} \quad \text{или} \quad W'_{yx} = \frac{G_{yx}}{G_y} \\ W'_{yx} &= \frac{W'_{yx}}{1 + W'_{yx} W'_{yx}} = \frac{G_{xy} \cdot G_y}{G_y \cdot G_x + G_{yx} \cdot G_{xy}} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Если априори неизвестно, со стороны какого процесса (δx или δy) возбуждается закрытая система, то передаточная функция $W'_{yx}(\omega)$, найденная по реализациям δx и δy может соответствовать как выражению



$$W_y = \frac{W_{yx}}{1 - W_y W_{yx}} \quad (3.23)$$

так и выражению

$$W_y = \frac{1 - W_y W_{yx}}{W_{yx}} \quad (3.24)$$



Рис. 3.3. Разные точки возбуждения систем с обратной связью

Процесс δx (см. рис. 3.1, 3.2) является внешним по отношению к исследуемой системе. Если иной внешний источник b_q , возбуждающий систему, является неизмеряемым, а измерения процессов δx и δy являются внутренними, то по паре δx δy извлекается только одна передаточная функция W_{yx} или W_{xy} (рис. 3.3).

Таким образом, для оценки передаточных функций необходимо знать точки приложения внешнего источника шума и отсчитывать процессы на входные, выходные и внутренние.

В этом состоит существенное различие динамических и шумовых исследований. И те, и другие базируются на одних и тех же динамики, за исключением шумовых экспериментов необходимо добавить дополнительные знания априорных сведений.

3.7 Авторегрессионное разложение автоспектральной плотности на физически интерпретируемые составляющие

Рассмотрим формализм, применяемый в практике реакторно-шумовых исследований, в соответствии с которым передаточная функция определяется по единственному измеренному выходному случайному процессу. Очевидно, такое возможно только, если априори известен входной процесс. В некоторых случаях допустимо предположение, что в исследуемом диапазоне частот входным процессом является белый шум, тогда для определения передаточной функции (или ее параметров) идеально подходит метод одномерного авторегрессионного (АР) моделирования.

Представление реализации шума $x(j)$ в виде АР-модели p -го по-

рядки

$$x(t) = a_1 x(t-1) + \dots + a_p x(t-p) + e(t) \quad (3.25)$$

после z преобразования равносильно представлению

$$X(z) = H(z) E(z) \quad (3.26)$$

где $e(t)$ — белый шум, $E(z)$ — белый шум после z преобразования; $z = \exp(j2\pi f/F_d)$, F_d — частота дискретизации

$$H(z) = \left(1 + \frac{a_1}{z} + \dots + \frac{a_p}{z^p} \right)^{-1} \quad (3.27)$$

Таким образом, $X(z)$ есть результат пропущенного белого шума через фильтр с передаточной функцией $H(z)$, в которой заключены все спектральные особенности исходного процесса. $H(z)$ является дробно-рациональной функцией, поэтому она может быть однозначно разложена в сумму передаточных функций первого и второго порядка

$$H(z) = \frac{z^p}{z^p + a_1 z^{p-1} + \dots + a_p} = \sum_{i=1}^m \frac{C_i}{1 - \frac{z_i}{z}} + \sum_{j=1}^l \frac{B_j + A_j/z}{1 + D_j/z + E_j/z^2} \quad (3.28)$$

где m — число действительных корней; z_i — действительный корень; l — число пар комплексно-сопряженных корней полинома

$$z^p + a_1 z^{p-1} + \dots + a_p$$

По этим корням каждый резонанс АСПМ может быть охарактеризован частотой f и декрементом затухания k . Иными словами, каждому резонансу ставится в соответствие передаточное звено 2-го порядка, эквивалентное колебательному контуру со своей добротностью. Звенья 1-го порядка, характеризующиеся своими постоянными времени t_i , дают разложение АСПМ на составляющие вида $(1 + t_i z^{-1})^{-1}$ — которые, представляя собой инерционные звенья, могут быть связаны через параметры t_i с характеристиками измерительного тракта. Чтобы в разложении (3.25) всегда су-

существовало по крайней мере одно инерционное звено, порядок модели p всегда должен быть нечетным. Хотя и существуют критерии выбора оптимального порядка АР-модели, на практике лучше действовать эмпирически, методом проб и ошибок. Порядок АР-модели тем больше, чем больше в АСПМ резонансных особенностей. Если после некоторой итерации выбора порядка модели на каждом резонансе АСПМ соответствует свое инерционное звено, значит порядок должен быть увеличен, если таких звеньев получилось больше числа резонансов, значит порядок должен быть уменьшен. Например, АСПМ шумов термодары чаще всего имеет вид монотонно убывающей функции частоты. В этом случае бывает достаточен минимальный для данного формализма порядок $p = 3$, а полученное инерционное звено связывается с постоянной времени термодары.

По коэффициентам A, B, C может быть оценена мощность каждой составляющей разложения. Таким образом, по единственному шумовому каналу перечисленные параметры, вычисленные из АР-модели, позволяют разложить АСПМ по ее особенностям. Они являются диагностическими признаками, чувствительными к изменению местоположения резонанса на оси частот его амплитуды и добротности.

3.8 Многомерный авторегрессионный анализ

Теоретическое обоснование многомерного авторегрессионного анализа (МАР-анализа) вынесено в приложение, а в данном разделе рассматриваются его прикладные аспекты.

МАР-метод — универсальный инструмент исследования сложных динамических объектов, наблюдаемых по многим физическим каналам. В этом смысле РУ — очень подходящий объект исследования. Специалисты по реакторным шумам интенсивно применяют и развивают МАР-метод: им разработан так называемый метод МАР-декомпозиции, предназначенный для установления причинно-следственных взаимосвязей в исследуемом объекте.

Даже по традиционным спектральным характеристикам МАР-оценки имеют свои преимущества перед оценками, полученными с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). В частности, МАР-оценки не требуют временных окон, устойчивы на

малых длинх реализаций случайных процессов способны дать высокое частотное разрешение обобщаемы на нестационарные процессы.

МАР-модель допускает существование обратных связей между измеряемыми сигналами. Более того, она предназначена для анализа векторных процессов, все компоненты которых, вообще говоря, взаимосвязаны и, кроме того, имеют собственный независимый источник. Присутствие источника в схеме динамики так же физически обосновано: очевидно, что флуктуации в замкнутом контуре не могут возникнуть сами по себе, обязательно существует первопричина (в данном случае внешний источник), которая возбуждает контур (или несколько связанных контуров). Если какие-либо процессы не связаны или у какого-либо процесса отсутствует собственный источник, то МАР-анализ покажет это автоматически: будут равны нулю (в статистическом смысле) соответствующие передаточные функции или АСПМ собственного источника будет тождественно равна нулю.

Число включенных в МАР-анализ процессов m (размерность вектора X) сразу определяет число внешних независимых источников m и число передаточных функций в модели ($m^2 - m$). После выбора размерности вектора X сразу определяется и схема динамики исследуемого объекта, которая представляет собой схему взаимосвязей между наблюдаемыми (компонентами вектора X) и ненаблюдаемыми процессами (независимыми внешними источниками) в эксперименте.

В МАР-анализе оперируют следующими понятиями.

нормированный глобальный вклад — функции, описывающие взаимные влияния процессов (в процентах), и определяющие первоисточники резонансных особенностей;

модуль передаточных функций закрытых систем — ($m^2 - m$) модулей передаточных функций, соответствующих схемам на рис П1.1, П2.1—П2.3;

фаза передаточных функций закрытых систем — ($m^2 - m$) фаз передаточных функций соответствующих схемам на рис П1.1 П2.1—П2.3

модуль спектральных матриц внешних источников — основные критериальные функции (m^2 функций) с помощью которых устанавливается применимость данной МАР-декомпозиции;

истинная когерентность — матрица частных когерентностей, каждый элемент которой представляет собой спектральную функцию взаимосвязи только двух данных процессов за вычетом иных опосредованных взаимосвязей. Например, допустим, что третий процесс влияет и на первый, и на второй процессы. Очевидно, что во взаимосвязи первого и второго процессов помимо прямых собственных зависимостей будут присутствовать опосредованные взаимосвязи через третий процесс.

MAR-анализ значительно расширяет наблюдаемость исследуемого объекта без увеличения числа точек измерения. Продемонстрируем это на примере двумерной MAR-модели (рис. П1.1). Обладая только реализациями двух случайных процессов x_1 , x_2 и не пользуясь классическими методами спектрального анализа, невозможно оценить передаточные функции W_{21} , W_{12} , не говоря уже о величинах парциальных вкладов q_1 в x_1 , x_2 и q_2 в x_1 , x_2 или о спектральных характеристиках внешних источников q_1 и q_2 . Чтобы объект, описываемый схемой на рис. П1.1, был полностью наблюдаем с точки зрения классического спектрального анализа (т.е. были бы известны все спектральные характеристики любого из его процессов), необходимо зарегистрировать еще и «выходные» процессы y_1 и y_2 . Только тогда все перечисленные выше спектральные характеристики будут найдены. Как следует из теории MAR-моделирования, для двумерных схем тот же эффект достигается при вдвое меньшем числе точек измерения (x_1, x_2). Для произвольной размерности m объект будет наблюдаем с точки зрения классического анализа, если измеряются все координатные и выходные процессы каждого из них т.е. $2(m^2 - m)$ штук для MAR-анализа достаточно только m .

Обычная функция когерентности, независимо от того как она получена (MAR- или БПФ-анализом), не несет информации о происхождении связи $x_1 - x_2$: то ли это x_1 влияет на x_2 , то ли на оборот x_2 на x_1 . Оценку нормированных глобальных вкладов можно понимать как разложение обычной функции когерентности на составляющие по направлениям вклада, причем вклад q_1 в x_2 не совпадает с обратным вкладом q_2 в x_1 .

Формализм MAR-декомпозиции применим только тогда, когда внешние источники сигналов не коррелированы (см. Приложение П2). Для установления этого факта необходимо рассматривать

все элементы спектральной матрицы внешних источников. Условия некоррелированности внешних источников, как правило, всегда достигаются, если в МАР-модель входят случайные сигналы получаемые с датчиков различной физической природы или с датчиков, разнесенных на значительные расстояния друг от друга.

Рассмотрим конкретный пример МАР-анализа трехмерного вектора реакторных шумов, составленного из следующих процессов: анизотропного нейтронного шума реактора ($I2$), зарегистрированного нейтронной камерой; пульсаций давления теплоносителя ($P2$), зарегистрированных датчиком пульсаций давления; виброперемещений ГЦН $Rg1$ в радиальном направлении, зарегистрированных датчиком относительных перемещений.

Вертикальные отрезки на графиках, рассматриваемых ниже, выделяют исследуемые резонансы. На рис. 3.4 выделены два значимых резонанса: 5,0 и 6,1 Гц. На частоте 6,1 Гц (рис. 3.4,а) вклад давления ($P2$) в нейтронный шум ($I2$) составляет 24,7%, а в обратную сторону — только 1,2%. Это означает, что взаимосвязь между нейтронным шумом и пульсациями давления ТН на частоте 6,1 Гц, наблюдаемая по функции когерентности на уровне 0,3, порождена пульсациями давления, а не флуктуациями нейтронной мощности.

Действительно, на этой частоте в ЦК ВВЭР 440 наблюдается мощная акустическая стоячая волна, модулирующая плотность теплоносителя, а значит и нейтронный поток. Таким образом, мы являемся причиной-следственной связью: на рассматриваемой частоте первичны пульсации давления, а нейтронный поток — их следствие.

На частоте 5,0 Гц (рис. 3.4,б) вклад нейтронного потока в пульсации давления составляет 4,9%, а обратный вклад — 1,0%. Известно, что на этой частоте происходят колебания корпуса реактора совместно с активной зоной. Отсюда возникают флуктуации нейтронного потока, так как источник нейтронов — активная зона — то приближается, то удаляется от датчика (ИК). При колебаниях такого массивного элемента конструкции, как шахта активной зоны, возникают бегущие волны давления ТН, которые регистрируются ДПД. По данным результатам формально следует заключить, что на частоте 5,0 Гц нейтронный поток первичен, а пульсации давления — вторичны. Очевидно, это не так: оба сиг-

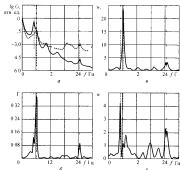


Рис. 3.4. Трехканальные спектральные функции (блок 1 Кс/СС): а — АСПМ (сплошная линия — нейтральный шум, штриховая — пульсации давления); б — когерентность; в, г — результаты MAP-декомпозиции — нормированные глобальные моды для сигналов ДПД и НК (в — вклад сигнала ДПД в сигнал НК, г — наоборот)

налы есть следствие другого переконструктора. Первично колебание шахты активной зоны, но в данной модели нет такого «примого» сигнала, каковым бы мог быть сигнал датчика вибраций установленного на шахте. О том, что выбранная MAP-модель не содержит сигнала-переконструктора, свидетельствует низкий уровень глобальных вкладов

С помощью MAP-анализа можно интерпретировать только те частоты, на которых функция когерентности значительно отличается от нуля. В данном случае наблюдаются всего три таких резонанса на частотах 3,0; 6,1 Гц и оборотной частоте ГЦН — 24,3 Гц (рис. 3.4,б). Очевидно, что в качестве источника последнего ре-

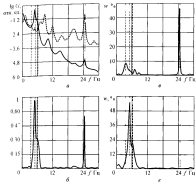


Рис. 3.5. АСПМ (а, сплошная кривая — нейтральный алюминий, пунктирная — перемещение ГЦН), когерентность (б) и глобальные энергетические вклады сигналов датчика перемещений ГЦН и ИК (в — вклад сигнала датчика перемещений ГЦН в сигнал ИК, г — наоборот)

зонанса не могут выступать ни пульсации давления, ни нейтронный шум. На соответствующих графиках глобальных вкладов (рис. 3.4 в—г) на оборотной частоте ГЦН наблюдается локальный минимум.

Для следующей пары сигналов (ДОП, установленный на ГЦН и ИК) на графике глобального вклада перемещений ГЦН в нейтронный шум (рис. 3.5, в) наблюдается еще один резонанс на частоте 3,54 Гц. Несмотря на значение вклада, равное 8,3%, он не подлежит интерпретации, так как на этой частоте функция когерентности практически нулевая. Данный график подтверждает опасение: первоисточником резонанса на оборотной частоте служат виброперемещения ГЦН. Здесь вклад в нейтронный шум со-

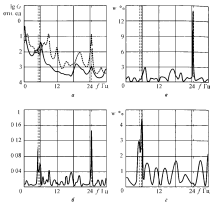


Рис. 3.6. АСПМ (а, сплошная кривая — перемещения ГЦН, штриховая — пульсации давления), когерентность (б) и глобальные взаимные вклады сигналов датчика перемещений ГЦН и датчика пульсаций давления ТН (в — вклад сигнала датчика перемещений ГЦН в сигнал датчика пульсаций давления ТН; г — наоборот)

ставляет 47%, а в обратную сторону — 0,7%. Верно также заключение, что колебания шахты на частоте 5 0 Гц воздействуют и на ГЦН, так как вклад нейтронного шума в виброперемещения ГЦН составляет 53%. На графике АСПМ виброперемещений ГЦН виден небольшой резонанс на этой частоте. Теперь можно утверждать, что это вынужденные колебания ГЦН а не колебания на его собственной частоте.

Для следующей пары сигналов (ДПД и ДОП) когерентность значимо ненулевая только на оборотной частоте (рис. 3.6). Соответственно и вклад перемещений в давление ТН (14%) — единственный значимый вклад, подлежащий интерпретации. Это обусловлено тем, что в MAP модели рассматриваются перемещения

ГЦН первой петли реактора, а пульсации давления ТН второй петли. В одной петле взаимовлияние вибрирующий ГЦН и пульсаций давления состоялось бы на большем числе резонансов

3.9 Кепстральное преобразование

Кепстрин называется временная функция, полученная следующим нелинейным преобразованием АСПМ

$$C(\tau) = F^{-1}[\lg G(\omega)] \quad (3.29)$$

где F — операция обратного преобразования Фурье, $G(\omega)$ — АСПМ.

В отличие от корреляционной функции, которая является линейным преобразованием АСПМ

$$K(\tau) = F^{-1}[G(\omega)] \quad (3.30)$$

кепстр обладает целым рядом важных для выявления скрытых периодичностей свойств.

Например, если в спектре среди прочих резонансов содержится ряд резонансов на гармонических частотах $k f_0$, $k = 1, 2, 3, \dots$, то и в корреляционной функции, и в кепстре будет наблюдаться локальный максимум в координате $1/f_0$. Однако если гармонические резонансы различаются по амплитуде, например, убывают с возрастанием частоты (что часто наблюдается на практике), то кепстр их выделит контрастнее. Как следует из определения кепстра, взаимное различие амплитуд резонансов нивелируется операцией логарифмирования.

Рассмотрим случай, типичный для вибродиагностики вращающихся механизмов. В спектрах сигналов вибродатчиков, как правило, наблюдается несколько периодических рядов, связанных с гармониками, суб- и супергармониками оборотной частоты ротора, а также возможно присутствие гармонических рядов некоторых комбинационных частот (как диагностический признак дефекта). В таких сложных спектрах периодичность группы резонансов очевидна

В качестве примера рассмотрим процесс

$$y(t) = x(t) + x(t - 50) + x(t - 63)$$

полученный сдвигом во времени одного и того же процесса $x(t)$. Подобное искажение $x(t)$ называют эхо сигналом. После Фурье-преобразования имеем:

$$Y(f) = X(f)[1 + \exp(-j2\pi f \cdot 50) + \exp(-j2\pi f \cdot 63)]$$

откуда АСПМ записывается в виде

$$G_y(f) = G_x(f)|1 + \exp(-j2\pi f \cdot 50) + \exp(-j2\pi f \cdot 63)|^2$$

Получается, что возникновение эхо сигнала эквивалентно фильтрации исходного процесса фильтром с передаточной функцией $H(f)$

$$G_y(f) = G_x(f)|H(f)|^2 = G_x(f)|1 + \exp(-j2\pi f \cdot 50) + \exp(-j2\pi f \cdot 63)|^2$$

Модуль передаточной функции имеет громоздкий вид, но очевидно, что в нем содержатся следующие члены, обуславливающие периодичность резонансов АСПМ: $\cos [2\pi f(63 - 50)]$, $\cos [2\pi f(63 + 50)]$, $\cos [2\pi f \cdot 63]$, $\cos [2\pi f \cdot 50]$, $\cos [2\pi f(2 \cdot 63 - 50)]$. Сразу выделить их из АСПМ (рис. 3.7,а) крайне затруднительно.

Все перечисленные группы резонансов выделены кепстром (см рис. 3.7,б), где одному частотному ряду в АСПМ соответствует один максимум в кепстре.

Корреляционная функция, конечно, в таком виде спектральные периодичности не выделит. Действительно как следует из самих определений корреляционной функции и кепстра имеем

$$\begin{aligned} K(\tau) &= F[G_y(\omega)] = F\left[G_x(\omega) |H(\omega)|\right] = F[G(\omega) \otimes F^{-1}\left[|H(\omega)|^2\right]] \\ C(\tau) &= F[\lg G(\omega)] = F\left[\lg G(\omega) + \lg |H(\omega)|^2\right] \\ &= F[\lg G(\omega)] + 2F[\lg |H(\omega)|] \end{aligned}$$

где $\otimes$ — оператор свертки

Для корреляционной функции $\lg |H(\omega)|^2$, который из

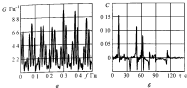


Рис. 1.7. Спектр зва-сигнала (а) и его огибающая (б)

гармонического ряда делает δ -функцию, будет «смазан» операцией свертки. А для огибающей член $F^{-1}[|g|H(\omega)]$, который из гармонического ряда с разными амплитудами резонансов также делает δ -функцию аддитивно входит в результирующее выражение.

3.10. Огибающая

3.10.1. Определение огибающей и метод ее оценки

Огибающая $A(t)$ сигнала $x(t)$ определяется через преобразование Гильберта $H[x(t)]$

$$H[x(t)] - x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\alpha)}{t - \alpha} d\alpha = \frac{1}{\pi} x(t) \otimes \frac{1}{t}$$

$$z(t) = x(t) + jx(t) = A(t) \exp(j\phi(t)) \quad (3.31)$$

Иными словами, огибающая есть модуль комплексной функции $z(t)$, действительная часть которой совпадает с исходным сигналом, а мнимая — с преобразованным по Гильберту исходным сигналом.

Для оценки огибающей применяется преобразование Фурье $F[x(t)] = X(f)$ с использованием известного свойства свертки $F[x(t) \otimes y(t)] = F[x(t)]F[y(t)]$. Если преобразовать по Фурье комплексную функцию $z(t)$

$$F[z(t)] = X(f) + jX(f) = X(f) + j(-j) \operatorname{sgn} f X(f) = \\ X(f)(1 + \operatorname{sgn} f) = \begin{cases} 2X(f) & f > 0 \\ 0, & f < 0 \end{cases}$$

где $\operatorname{sgn} f = \begin{cases} +1 & f > 0 \\ -1 & f < 0 \end{cases}$ то обратное преобразование Фурье дает искомую функцию $z(t)$

$$F^{-1}[X(f)B(f)] = z(t) \quad (3.32)$$

где $B(f) = \begin{cases} 2 & f > 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases}$ Теперь чтобы получить огибающую остается

только вычислить модуль функции $z(t)$

До введения формализма описанного выше, огибающая определялась неоднозначно. Исторически сложилось так, что понятие огибающей, чаще всего используемое в радиотехнике для оперирования с амплитудно модулированными сигналами, вводилось через так называемое квадратичное детектирование и низкочастотную фильтрацию (рис. 3.8)

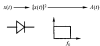


Рис. 3.8. Принятое в радиотехнике определение огибающей

Неопределенность частоты среза фильтра f_0 и определяла неоднозначность огибающей. Для оценки огибающей через преобразование Гильберта не требуется задание каких-либо параметров т.е. сигналу $x(t)$ соответствует единственная огибающая $A(t)$

3.10.2 Пример интерпретации совместных колебаний корпуса реактора и внутрикорпусной шашки с помощью огибающей

В диагностике огибающую чаще всего применяют как эффективное средство построения диагностических признаков по широкополосным вибросигналам для диагностирования вращающихся механизмов [59]. Покажем, что в реакторной диагностике этим ее применение не ограничивается

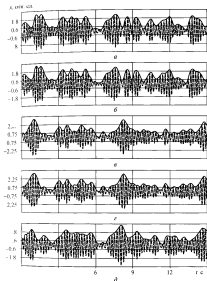


Рис. 1.9. Профильтрованные в диапазоне 1,8–5,1 ГГц сигналы и отбрасываемые сигналы ДАП1 (а), ДАП2 (б), ДАП3 (в), ДАП4 (г) и ИК (д). Блок I Кольской АЭС

В АСПМ четырех сигналов ДАП установленных на крышке корпуса реактора ВВЭР-440 блока I КоАЭС доминирует резонанс на частоте 4,9 ГГц. Существующие зазоры в шпонках обусловленные их износом, или зазоры в разделителе потока — факторы, ко

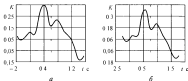


Рис. 3.10 ВКФ огибающих сигналов ДАП $A_1 - A_2$ (а) и $A_3 - A_4$ (б)

торые могут служить амплитудными ограничителями вибрации, приводящими к нелинейным и нестационарным эффектам. Можно ожидать, что огибающая способна порождать такие диагностические признаки, которые будут более чувствительны к изменению вибросостояния корпуса и шахты, чем различные фазовые соотношения.

Рассмотрим огибающие сигналов ДАП и ИК (рис. 3.9). Для огибающих соседних сигналов ДАП наблюдаются различные запаздывания.

Все ВКФ между огибающими сигналов соседних датчиков (рис. 3.10) имеют характерный двугорбый вид, причем один локальный максимум находится в отрицательной абсциссе, что соответствует запаздыванию, а другой — в положительной, равной по модулю, что соответствует опережению. Если огибающую трактовать как низкочастотную мощность вибраций, то это означает, что в любой паре сигналов соседних ДАП наблюдается обмен мощностью в двух противоположных направлениях: на некотором временном интервале сигнал A_i запаздывает по отношению к сигналу A_{i+1} , а на смежном временном интервале наоборот сигнал A_{i+1} запаздывает по отношению к A_i .

Такое возможно, когда траектория колебаний корпуса представляет собой раскручивающуюся спираль на одном временном интервале (мощность сигнала перетекает от A_i к A_{i+1}) а на смежном временном интервале — скручивающуюся спираль (мощность сигнала перетекает в обратном направлении от A_{i+1} к A_i) и т.д. Период таких осцилляций мощности, как следует из абсцисс локальных минимумов ВКФ, составляет 0.4 с.

Огибающая сигнала ИК очень близка по форме к огибающим соответствующих сигналов ближайших ДАП (см. рис. 3.9), т.е. выводы о сложной траектории (по спирали) справедливы и для шахты АкЗ

3.11 Деконпозиция спектральных образов сигналов датчиков абсолютного перемещения по типам колебаний корпуса реактора

В реакторно шумовой диагностике неоднократно предпринимались попытки автоматизировать рутинный анализ многомерной информации. Например, в работе [60] разработан метод разложения по физическим источникам (по типам колебаний) спектральных характеристик сигналов внезонных нейтронных детекторов. Датчики абсолютных перемещений, так же как и ионизационные камеры, чувствительны ко многим типам колебаний корпуса реактора и ВКУ

В отличие от сигналов нейтронных детекторов сигналы ДАП менее зашумлены (в них отсутствует глобальная реактивная составляющая), они, как правило, обладают высокой когерентностью именно из-за эффектов колебаний, а не побочных сильно-коррелированных явлений, они более высокочастотны (так как их сигналы не опосредуются передаточной функцией «нейтронный поток — реактивность») и легко пересчитываются в абсолютные единицы перемещения. Перечисленные особенности сигналов ДАП требуют своего формализма деконпозиции по типам колебаний, который был разработан и представлен на конференции SMORN-VI [61]

Данный формализм основан на том, что четыре ДАП — А1 А2 А3 А4, установленные на крышке реактора в углах квадрата (рис. 3.11), чувствительны к следующим элементарным типам колебаний корпуса реактора и ВКУ: балочным однонаправленным круговым, вертикальным и балочным многонаправленным

1) *Балочные однонаправленные колебания* — маятниковые колебания в детерминировано определенной вертикальной плоскости

Вклад данного типа колебаний в сигнал ДАП А1 обозначим через δ . Направление балочных колебаний — угол α — будем отсчитывать против часовой стрелки от этого же ДАП А1. Тогда

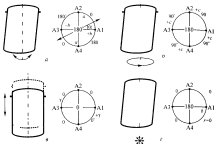


Рис. 3.11 Элементарные типы колебания корпуса реактора и/или shaft активной зоны:

а — балочные однонаправленные б — круговые в — вертикальные г — балочные многонаправленные

вклад в сигнал противоположного ДАП А3 будет $-B$ а вклад в сигналы соседних (смежных) ДАП соответственно A — в ДАП А2 и $-A$ — в ДАП А4. Зная вклады A и B можно оценить угол α и полную амплитуду колебаний C в этом направлении:

$$\cos \alpha = A/B \quad C^2 = A^2 + B^2$$

2) *Круговые колебания.* При этом типе колебаний горизонтальная плоскость, в которой установлены ДАП, совершает периодические круговые движения вокруг вертикальной оси. Фазовый сдвиг между сигналами соседних ДАП будет составлять $\pi/2$, а между противоположными ДАП — π . Вклад во все сигналы одинаковый.

3) *Вертикальные колебания.* Любые комбинации пар сигналов — синфазны, т. е. здесь наблюдается полная аналогия с глобальным нейтронным шумом. Вклад во все сигналы одинаковый и равен V .

4) *Балочные многонаправленные колебания* — маятниковые коле-

бания в случайных вертикальных плоскостях. Будем считать, что направления этих стохастических колебаний равномерно распределено по углу в диапазоне $[0-2\pi]$, а амплитуда вклада в каждый сигнал составляет величину M . Причем сигналы противоположных ДАП всегда противофазны, а сигналы соседних ДАП некоррелированы (в силу стохастичности направления колебаний), т. е. фаза не определена. Допускается, что все перечисленные элементарные типы колебаний A, B, C, V, M не коррелируют между собой.

С учетом того, что каждый датчик помимо перечисленных выше источников чувствителен еще и к некоторым локальным некоррелированным шумам N_i ($i = 1, 2, 3, 4$), несложно записать всевозможные АСПМ и ВСПМ. Например, АСПМ сигнала ДАП А1 и ВСПМ сигналов противоположных ДАП будут иметь вид:

$$G_1(F) = N_1^2(F) + B^2(F) + C^2(F) + V^2(F) + M^2(F)$$

$$G_{2,4}(F) = G_{2,4}(F) = B^2(F) - C^2(F) + V^2(F) - M^2(F)$$

АСПМ сигналов других ДАП аналогичны и отличаются только первым слагаемым (за шумением). Все ВСПМ сигналов соседних ДАП совпадают друг с другом, например, ВСПМ сигналов ДАП А1 и А2 будет иметь вид:

$$G_{2,3}(f) = AB + C^2 \exp(i\pi/2) + V^2 \quad (3.33)$$

Таких взаимосвязей достаточно, чтобы найти все неизвестные вклады (A, B, C, M, V, N_i). Если сигналы ДАП откалиброваны, то и найденные амплитуды каждого типа колебаний можно представить в абсолютных единицах (например, в микрометрах). Если на какой-то частоте совершается сложное движение корпуса реактора, то в результате декомпозиции оно будет разложено в сумму элементарных, перечисленных выше независимых по предположению типов колебаний. Например, движение днища корпуса реактора по эллиптической траектории (сложное движение) однозначно раскладывается в сумму двух элементарных типов — магнитного и кругового колебаний. Ниже приведены преимущества такой декомпозиции по сравнению с традиционным ручным анализом всевозможных фаз ВСПМ между сигналами ДАП:

Автоматическая декомпозиция

Производит я для любых значений фаз

На любой частоте раскладывает сложное движение по элементарным типам колебаний

Дает точное значение угла плоскости маятниковых колебаний

Дает абсолютные величины амплитуд по каждому типу колебаний

Возможна при известных фазовых портретах

Удобна для мониторинга за большим числом резонансов

Ручная обработка фаз ВСПМ

Производится для характерных значений фаз из ряда 0, π , $\pi/2$

Сопоставит с некоторой частотой только один тип колебаний

Дает грубые оценки направления маятниковых колебаний (из квадранта в квадрант)

Не дает информации об абсолютных величинах амплитуд колебаний

Невозможна при известных фазовых портретах, когда отсутствуют корреляции между некоторыми параметрами сигналов ВСПМ

Громоздка при большом числе резонансов

Используя графики спектральных разложений по каждому типу колебаний (рис. 3.12), составим таблицу для доминирующих резонансных частот (табл. 3.1)

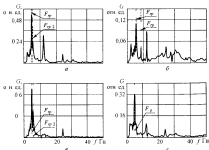


Рис. 3.12. Результаты декомпозиции сигналов ДАП блока I Кольского АЭС (АСПМ) на элементарные типы колебаний корпуса реактора:

а — однонаправленные; б — вертикальные; в — крутовые; г — стохастические колебания. $F_{\text{ш}}$ — частоты совместных колебаний корпуса и шашты

Таблица 3.1 Результаты декомпозиции на демпфированных частотах (Блок I КАСЭС)

Частота, Гц	АСТМ по типам колебаний, сек. ед.			
	Маятниковые однонаправ- ленные	Круговые	Вертикальные	Маятниковые стохастиче- ские
2,93	0,10	0,06	0,02	0,15
3,71	0,16		0,06	
4,10			0,06	0,18
4,88	0,35	0,37	0,11	0,20
5,08	0,37			0,20
5,76	0,27	0,37	0,09	
10,35	0,02	—		0,03
11,13		0,02		0,03
11,91	0,12	0,04	0,04	0,05
12,70	0,06	0,05	0,02	0,04
14,26	0,05	0,03		0,05
24,61	0,07	0,05	0,45	0,08

На частотах 4,88 и 5,76 Гц происходят не только круговые, но и маятниковые, и вертикальные колебания, а на частоте 4,88 Гц присутствует и стохастический компонент. В результате получили разложение сложного трехмерного колебания корпуса реактора на элементарные движения. Продолжая аналогию с маятником, получаем, что груз маятника описывает эллиптическую траекторию с элементами случайных флуктуаций, а точка его подвеса при этом совершает вертикальные колебания.

Отличительной особенностью автоматической декомпозиции является идентификация частот, которые не могут быть классифицированы «ручным» анализом из-за неполноты фазовых портретов (11,13; 12,70; 14,26 Гц). На этих частотах присутствует значительный компонент стохастических маятниковых колебаний, обуславливающий когерентность между сигналами соседних ДАП, близкую к нулю. На оборотном частоте примерно в равных долях присутствуют все типы колебаний.

Еще одно существенное отличие автоматической декомпозиции от «ручной» состоит в выделении частот 2,93; 3,71; 4,10 Гц, которые являются собственными частотами колебаний оборудования петель. Как видно из табл. 3.1, их совокупное воздействие на кор

пус приводит к доминированию маятниковых (однонаправленных и/или стохастических) колебаний

Обособленный анализ авто- и взаимных спектральных характеристик сигналов ДАП позволяет квалифицированным экспертам вручную произвести их декомпозицию по физическим источникам (при наличии оценок АСПМ, фазы ВСПМ и функций когерентности). Мониторинг колебаний корпуса реактора и ВКУ силами эксплуатационного персонала, несомненно, должен поддерживаться автоматическими процедурами декомпозиции. Предметом контроля являются абсолютные значения спектральных разложений по каждому типу колебаний на частотах резонансов и их соотношения между собой. Изменения этих диагностических признаков во времени из-за появления какой-либо неисправности дают ключ к пониманию причины ее происхождения

3.12. Методы анализа нейтронных шумов при маскирующем воздействии глобального компонента

В практическом анализе как и внутризонных нейтронных шумов чаще всего решают задачи двух классов. Первый — выделение транспортного запаздывания одного сигнала нейтронного детектора по отношению к другому с тем, чтобы оценить скорость (расход) ТН, второй — выделение фазовых соотношений между сигналами нейтронных детекторов на определенной частоте с тем, чтобы идентифицировать некоторый колебательный процесс ВКУ, ТВС или органов регулирования. Первый класс задач обычно распространяется на внутризонный нейтронный шум, второй и на внутризонный, и на внезонный нейтронный шум. Как правило, в первом классе анализируют диапазон частот, во втором — дискретную частоту. Простейший формализм для первого класса имеет вид

$$\begin{cases} x(t) = x(t) + g(t); \\ y(t) = x(t - \tau_0) + g(t) \end{cases} \quad (3.34)$$

во временной области и

$$\begin{cases} X(f) = S(f) + G(f) \\ Y(f) = S(f) \exp(-j2\pi f \tau_0) + G(f) \end{cases} \quad (3.35)$$

в частотной области. Здесь $x(t)$, $y(t)$ — сигналы нейтронных детекторов; $z(t)$ — составляющая сигналов, несущая информацию о транспортном эффекте; $g(t)$ — глобальное зашумление; t_0 — время запаздывания; $X(f)$, $Y(f)$, $S(f)$, $G(f)$ — Фурье-образы функций $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $g(t)$, соответственно.

Системы (3.34) и (3.35) находятся во взаимно однозначном соответствии как прямое и обратное преобразования Фурье случайных процессов. Например, маскирующий глобальный компонент $g(t)$ имеет Фурье-образ $G(f) = F[g(t)]$. Ниже первому классу задач будет посвящен целый раздел, а в данном разделе описываются традиционные подходы к решению второго класса задач.

Для него также можно выписать аналогичные системы: во временной области сигнальный член $z(t)$ будет иметь синусоидальный вид $z(t) = z_0 \sin 2\pi f t$ в первом уравнении и сдвинутый по фазе — во втором уравнении $z(t) = z_0 \sin (2\pi f t + \varphi)$. Соответствующие δ -функции в частотном представлении обычно не показывают в явном виде:

$$\begin{cases} X(f) = S(f) + G(f); \\ Y(f) = S(f) \exp(-j2\pi\varphi) + G(f) \end{cases} \quad (3.36)$$

подразумевая, что сигнальным компонент определен в единственной точке частотной оси, а искомая фаза φ является числом, а не линейной функцией частоты как в первом классе задач.

Постановка задач для обоих классов имеет много общего, в простых случаях фазовые соотношения можно представлять в терминах запаздывания, как и наоборот — временное запаздывание в терминах фазового сдвига. Непосредственное вычисление фазы приводит к следующей формуле:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ФФ}}(f) - \arctg \left[\operatorname{Im} [G_{\text{ФФ}}(f)] / \operatorname{Re} [G_{\text{ФФ}}(f)] \right] = \\ \arctg \left[\sin \varphi / (\cos \varphi + k(f)) \right] - \begin{cases} \varphi & k(f) = 0 \\ 0 & k(f) \rightarrow \infty \end{cases} \end{aligned} \quad (3.37)$$

где $k(f) = G_g(f)/G_s(f)$ — отношение АСПМ глобального шума к АСПМ шуму сигнала. Из (3.37) следует, что только для нулевого глобального компонента оценка фазы будет достоверна, во всех

других случаях будет наблюдаться систематическое смещение, а когда глобальный шум значительно превосходит сигнальное слабое (что и наблюдается на практике: $G(f) \gg S(f)$) оценка фазы всегда близка к нулю.

Очевидно, существуют некоторые общие приемы борьбы с маскированием глобальным компонентом. Самый простой прием — это вычитание одного уравнения системы (не важно, во временной или частотной области) из другого. Этот прием правомерен, если выполнены два ограничения:

однородные слабые уравнения как случайные процессы должны совпадать не только по своим усредненным характеристикам, но и поординатно (поточечно) как детерминированные процессы;

нейтронные детекторы должны находиться в одинаковых условиях, быть идентичными в частности, должны быть одной эффективности, чтобы глобальный компонент одинаково вкладывался и в тот, и в другой сигналы детекторов.

Строго говоря, на практике не выполняется ни одно из перечисленных условий, поэтому компенсация глобального компонента будет не полной. В идеальном случае разностный процесс в частотной области имеет вид

$$X(f) - Y(f) = S(f)[1 - \exp(-j\varphi)] - 2jS(f)\exp(-j\varphi/2)\sin\frac{\varphi}{2}$$

а его АСПМ

$$G_{X-Y}(f) = 4G_S(f)\sin^2\frac{\varphi}{2} \quad (3.38)$$

Таким образом, получена функция, в которой отсутствует глобальный компонент, которая принимает свой максимум в случае, если сигналы противофазны, и минимум (аннулируется), когда сигналы синфазны. Если фаза является функцией частоты, то функция обладает свойством *sink*-структуры, в частности, периодичностью.

В следующем приеме компенсация глобального компонента происходит на уровне спектральных плотностей в результате чего снимается ограничение о поточечном совпадении глобального компонента в сигналах двух нейтронных детекторов. Для этого

оцениваются АСПМ и ВСПМ системы уравнения (3.36)

$$\begin{cases} G_x(f) - G_y(f) - G_z(f) + G_\varphi(f) \\ G_x(f) - G_z(f) \exp(-j\varphi) + G_\varphi(f) \end{cases} \quad (3.39)$$

а затем по этим оценкам строится селектирующая функция

$$P(f) = [G_x(f) + G_y(f)] - 2\operatorname{Re}[G_{xy}(f)] = 2G_x(f) + 2G_y(f) - 4[G_x(f)\cos\varphi + G_y(f)] - 4G_z(f)\sin^2\frac{\varphi}{2} \quad (3.40)$$

Совпадение результатов (3.38) и (3.40) свидетельствует о том, что рассмотренные приемы достигают одной и той же цели — компенсации глобального компонента нейтронного шума — разными путями.

Если стоит задача оценивания фазы и амплитуды сигнального сложного нейтронного шума, то, очевидно, что двух нейтронных датчиков недостаточно. Допустим, что вокруг АкЗ расположены три нейтронных детектора, тогда по аналогии с (3.40) для каждой пары по селектирующим функциям справедливы равенства

$$\begin{cases} R_{12}(f) - 4G_z(f)\sin^2\frac{\varphi}{2} \\ R_{13}(f) - 4G_z(f)\sin^2\frac{\varphi_2}{2} \\ R_{23}(f) - 4G_z(f)\sin^2\frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{2} \end{cases} \quad (3.41)$$

Эта система из трех уравнений с тремя неизвестными позволяет оценить и фазу и амплитуду вибраций. В основе многих предложений по компенсации глобального компонента нейтронного шума для описания вибрации внутрикорпусной шахты лежит именно такой подход. Увеличение числа внезонных нейтронных детекторов свыше трех приводит к перераспределенной системе уравнений типа (3.41), что можно употребить для улучшения точности оценок амплитуды и фазы вибраций шахты АкЗ, используя метод наименьших квадратов (МНК).

В [62] из каждого сигнала вычиталось среднее, получаемое по сигналам четырех нейтронных датчиков. Тем самым в некоторой степени компенсировался глобальный компонент.

В [63] глобальный компонент уничтожался в частотной области, что позволяет отнести данный метод к спектральным. Для его реализации необходимы четыре датчика, два из которых чувствительны к глобальному и сигнальному эффектам, а два других — только к глобальному (например, гамма-детекторы). Тогда из оценок возможных ВСПМ можно выделить только ВСПМ транс-портных составляющих.

В экспериментах на исследовательском реакторе [64] был найден аддитивный компонент погрешности оценки фазы, обусловленный глобальной составляющей. Авторы предложили использовать сигналы трех внутризонных детекторов нейтронного потока, чтобы составить отношение двух ВСПМ — в результате чего оценка фазы заметно линейризуется.

Сравнительный анализ методов компенсации глобального компонента во временной и частотной областях произведен в работе [65]. Был сделан вывод об эффективности вышеизложенных процедур в частотной области.

В современных исследованиях сознательно идут на значительное усложнение компьютерных алгоритмов обработки для выявления слабых корреляций. В эксплуатационных условиях, когда параметр t_0 изменяется в широком диапазоне значений, велико зашумление, выбор подходящего спектрального метода может быть единственным способом достижения приемлемой точности определения t_0 .

Список литературы

1. Poe G. Monitoring and diagnosis systems to improve NPP reliability and safety monitoring and diagnosis systems to improve nuclear power plant reliability and safety / Proc. of the specialists' meeting IAEA, May 14—17 1996, Gloucester, UK, P. 33—39.
2. Akerhielm F., Espelhelv R., Lorentzen J. Surveillance of vibrations in PWR / Prog. Nucl. Energy. 1982, Vol. 9, P. 453.
3. Turkcan E. On-line monitoring of a PWR for plant surveillance by noise analysis (SMORN-IV) // Ibid. 1985, Vol. 15, P. 265.
4. Hrusso P., Maudry J., Korok J. Technical diagnostics of V1 and V2 NPP at

- Beharick // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VII. June 19-23, 1993, Arignon, France. P. 361-371.
2. Katona T., Kozma R. Problems of estimation of the thermohydraulic parameters using neutron and temperature noise signals in PWR's (SMOPN IV) // Prog. Nucl. Energy. 1983. Vol. 9. P. 349.
3. Whittle P. On the fitting of multivariate autoregressions, and the approximate canonical factorization of a spectral density matrix // Biometrika. 1963. Vol. 50. P. 129.
4. Ogata R. Coherence analysis of systems with feedback and it's application to a BWR noise investigation // Prog. Nucl. Energy. 1982. Vol. 9. P. 137-148.
5. Glocker O. Fault detection via sequential probability ratio test of multivariate autoregressive modeling based residual time series // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI. May 19-24, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 10. Sensor monitoring and signal validation methods. Vol. 2. P. 70-81.
6. Ogata R., Turkcan E. Application of an improved noise analysis method to investigation of PWR noise: signal transmission path analysis (SMORN 4) // Prog. Nucl. Energy. 1983. Vol. 15. P. 863-873.
7. Albrecht R., Seifritz W. The information in neutron fluctuations // Nucl. Sci. and Engng. 1970. Vol. 41. P. 417-420.
8. Thie J.A. Reactor noise monitoring for malfunctions // Reactor Technology 1971. Vol. 14. N 4. P. 354-365.
9. Seifritz W., Stegmann D. Reactor noise analysis // Atomic Energy Re 1971. Vol. 9. N 1. P. 129-135.
10. Uhre R.E. Noise analysis in power reactor // Electrical World. 1973. Vol. 180. N 11. P. 44-56.
11. Williams M.M.R. Random Processes in Nuclear Reactors. Oxford: Pergamon Press, Ltd., 1974.
12. Saito K. On the theory power reactor noise (I, II, III) // Ann. Nucl. Sci. and Engng. 1974. Vol. 1. P. 31, P.107, P.209.
13. Saito K. Source papers in reactor noise // Prog. Nucl. Energy. 1979. Vol. 3. P. 157-168.
14. Bernard P., Brillou A., Carre J.C. Neutron noise measurements of PWR's // Ibid. 1977. Vol. 1. P. 333-346.
15. Some aspects of the theory of neutron noise due to propagating disturbances // T. Katona, L. Medko, G. Por, J. Valko // Ibid. 1982. Vol. 9. P. 209-222.
16. Kestie L.J., Runkel J., Stegmann D. Thermohydraulics surveillance of pressurized water reactors by experimental and theoretical investigations of the low frequency noise field // Prog. Nucl. Energy. 1983. Vol. 15. P. 879-887.
17. Thie J.A. A review of 1. OECD specialist meeting on continuous monitoring

- tering techniques for assuring coolant circuit integrity // *Nucl. Safety*. 1986. Vol. 37, N 2, P. 193—198.
21. Monitoring and aid to diagnosis of France PWRs. / A. Jousellin, A. Treuty, J.C. Benas et al. // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VII*. June 19—23, 1995, Arignon, France. Session 7 — System feedback experience and new system development. Vol. 2, P. 7.4.
22. Uchiyama J., Skali K. A reactor equipment monitoring system for Japanese PWRs. Systeme de surveillance pour les REP Japonais // *Ibid.* P. 7.6.
23. Kosaly G. Noise investigation in BWR and PWR // *Prog. Nucl. Energy* 1980. Vol. 5, P. 145—199.
24. Kosaly G., Wach D. Investigation in the joint effect of local and global damping sources in in-core neutron noise measurement // *Atomkern-Energie* 1975. Bd 23, S. 244—248.
25. Kosaly G., Mesko L. Theory of the auto-spectrum of the local components of PWR // *Ann. Nucl. Energy*. 1976. Vol. 3, P. 233—238.
26. Van Dam H. Neutron noise in BWR // *Atomkern-Energie* 1976. Bd 27. Ufg. 1, S. 8—27.
27. Determination of void fraction profile in a BWR channel using neutron noise analysis / M.A. Atta, D.N. Fry, J.E. Mott, W.T. King // *Nucl. Sci. and Engng.* 1978. Vol. 66, P. 264—268.
28. Thie J.A. Noise Sources in Power Reactor // *Symp. on noise analysis in nuclear systems*. June, 1964, Oak-Ridge, Tennessee. P. 357—365.
29. Тай Д.А. Стохастические процессы в ядерных реакторах и измерение динамических характеристик. М.: Атомиздат, 1966.
30. Kosaly G., Marotti L., Mesko L. A Simple space dependent theory of the neutron noise in a BWR // *Ann. Nucl. Energy*. 1975. Vol. 2, P. 315—317.
31. Fuge R., Valko J., Grifon T. Measurement of the local and global effect of bubbles in a water moderated reactor // *Ibid.* 1977. Vol. 4, P. 161—165.
32. Wach D., Sunder R. Improved PWR neutron noise interpretation on detailed vibration analysis // *Prog. Nucl. Energy*. 1977. Vol. 1, P. 309—315.
33. Detection of core barrel motion at WWER-440 type reactors / P. Schumann P. Liewers, W. Schmitt, F.-P. Weiss // *Ibid.* 1988. Vol. 21, P. 89—96.
34. Matis M.W., Smith C.M., Fry D.N. Characterization studies of BWR 4 neutron noise analysis spectral // *Ibid.* 1977. Vol. 1, P. 175—179.
35. Grabner A., Liewers P., Schuman P. Decompositions of noise signals composed of many similar components // *Ibid.* 1977. Vol. 1, P. 615—618.
36. Swamy E.J., Rencor V.P. Fuel-assembly vibration-induced neutron noise in PWR // *Ann. Ann. Meeting*. Detroit (USA), 1983. CONF-830609-31.
37. Вильямов Н.Н., Гуралов П.А., Салаверстов В.Н. Управление и безопасность ЯЭР. М.: Атомиздат, 1975.
38. Диагностика нейтронных шумов исследовательского реактора ВВР-М и влияние их на погрешности физических экспериментов / В.А. Га

- руков. К.А. Коноплев П.М. Лапшин и др. // Kerenergie 1983. Bd 26. H. 2. S. 68—74.
- 39 Marini J., Batty D., Spadi J. Neutron noise measurement of Buggy 2 PWR // Prog. Nucl. Energy. 1982. Vol. 9. P. 557—560.
- 40 Antonopoulos-Domis M., Cloekler O., Parsit I. Stochastic aspects of low dimensional vibration diagnostics // KFKI-1983-41. Budapest. 1983.
- 41 Ando Y., Kanemoto S., Takigawa Y. BWR simulation diagnosis by noise analysis // Prog. Nucl. Energy. 1977. Vol. 1. P. 163—167.
- 42 Altstadt E., Perov S., Weiss E.-P. Analysis of fluid-structure interaction at WWER-1000 type reactors // Proc. ICONE-8. 2—6 April, 2000, Baltimore USA. ICONE 5446.
- 43 Hazi G., Por G. Numerical simulator for noise diagnostic investigations in NPPs // Ann. Nucl. Energy. 1999. Vol. 26. P. 1113—1130.
- 44 Perov S., Altstadt E., Werner M. Vibration analysis of the pressure vessel internals of WWER-1000 type reactors with consideration of fluid-structure interaction // Ibid. 2000. Vol. 27. P. 1441—1457.
- 45 Bernard P., Clout J., Messinguirol C. PWR core monitoring by in core noise analysis // Prog. Nucl. Energy. 1982. Vol. 9. P. 541—546.
- 46 Fujita Y., Oraki H. Neutron noise monitoring of reactor core PWR internal vibrations at PWR's in Japan // Ibid. P.531—533.
- 47 Turkan E. Review of Borssele PWR noise experiments analysis and instrumentation // Ibid. P. 437—441.
- 48 Брланов В.В., Гусев Д.Ф., Павелко В.Н. Исследования характеристик вибродиагностики ВВЭР-1000 в эксплуатационных условиях // Атомная энергия. 1995. Т. 79. Вып. 5. С. 343—349.
- 49 Гусев Д.Ф., Павелко В.Н. Шумовые методы диагностики ВВЭР // Там же. 1997. Т. 82. Вып. 4. С. 264—271.
- 50 Treney A., Payal C., Klajnmic H. SINBAD, a data base for PWR internal vibratory monitoring // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI. 19—24 May, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 — Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 21.01.
- 51 Reactor internals and core support monitoring system. / T. Bogard, T. Kotlosky, S. Lowenfeld, N. Singleton // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI. 19—24 May, 1991, Gatlinburg Tennessee, USA. Session 4 — Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 19.01.
- 52 Maye C.W. Detailed neutron noise analysis of PWR internal vibrations // Atomkern-Energie. 1977. Bd 29, H. 9. P. 177—181.
- 53 Wach D. The analysis at-power neutron flux noise in the frequency range of vibrating reactor structures // Ann. Nucl. Energy. 1975. Vol. 2. P. 353—359.

54. Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. The experimental definition of the acoustic standing waves series shapes, formed in the coolant of the primary circuit of VVR 440 type reactor // *Prog. Nucl. Energy*. 1995. Vol. 29. N 3/4. P. 153—170.
55. Sumner R. Experiences and results with COMOC — an on-line vibration analysis and monitoring system // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI*. 19—24 May, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4. Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 42.01.
56. Piety K.R. Statistical algorithm for automated signature analysis of power spectral density data // *Prog. Nucl. Energy*. 1977. Vol. 1. P. 781—802.
57. Tamaki T., Kawano K., Sato M. On-line diagnosis algorithm based on noise analysis // *Ibid.* 1982. Vol. 9. P. 183.
58. Pavelko V.I. Methods of signature diagnostics by cross spectral fluviants // *Ibid.* 1995. Vol. 29. N 3/4. P. 239—246.
59. Боннар Л., Пигсон А. Применение корреляционного и спектрального анализа: Пер. с англ. / Под ред. И.Н. Копаленко. М., Мир, 1987.
60. Akerholm F., Espelfelt R., Lorenzen J. Surveillance of vibration in PWR // *Prog. Nucl. Energy*. 1982. Vol. 9. P. 453—465.
61. Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. Some results of the vibrations analysis on the WVER-440 // *Proc. a symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics (SMORN-VII)* 19—23 June 1995 Avignon France. P. 4.12.
62. Roston G., Kozma R., Kitamura M. Monitoring the state of the coolant in a boiling water reactor // *Specialists' meeting on in-core instrumentation and reactor core assessment. INCORE 96*. 14—23 October, 1996, Mito, Japan. P. 6.7.1—6.7.8.
63. Kleiss E.B., Osterkamp W.J. Experience with in-core neutron and gamma detectors for BWR coolant velocity measurements // *Prog. Nucl. Energy* 1985. Vol. 15. P. 735—743.
64. Sweeney F.J., Upadhyaya B.R., Shah D.J. In-core coolant flow monitoring of PWR using temperature and neutron noise // *Ibid.* P. 201—208.
65. Joshi S.S., Arora K.K., Kopardi R.V. Comparative study of measurement techniques for coolant transit times in a boiling water reactor using noise signals of LPRMs // *Ibid.* P. 921—929.

Оценка времени запаздывания в реакторно-шумовых исследованиях

4.1 Простенная модель

В реакторных приложениях для различных полей (нейтронного, температурного, гамма-поля, акустического) распространенной задачей является оценка запаздывания τ_0 одного случайного процесса $s(t - \tau_0)$ по отношению к другому $s(t)$. В радио- и гидролокации данная задача была поставлена намного раньше, чем в реакторно-шумовых исследованиях. В обзоре [1] обобщен данный опыт в приложениях именно к реакторным шумам. Показано, что к оценке величины τ_0 применимы некоторые общие принципы, решаемые в рамках задачи, получившей название Time Delay Estimation (TDE) — оценка времени запаздывания.

Информация о параметре τ_0 традиционно выделяется во временной области. В настоящее время наиболее распространенным является метод взаимной корреляционной функции. После опубликования работы [2] исследователи реакторных шумов стали проявлять повышенный интерес к иным методам выделения τ_0 и в частности, к спектральным методам [3, 4]. В [2] продемонстрированы неблагоприятные условия, сопутствующие реакторным измерениям, при которых ВКФ-метод дает настолько большие погрешности, что перестает быть состоятельным, однако рассмотренные спектральные методы позволяют выделять информацию о τ_0 с высокой точностью.

Проектами ВВЭР не предусмотрено прямое измерение показателя скорости теплоносителя, не измеряется непосредственно и его общеконтурный расход, который можно рассчитать по иным измерениям, а затем перейти к некоторому усредненному показателю расхода. Как любой усредненный по большому числу отдельных элементов параметр, средняя скорость через ТВС будет слабо зависеть от изменения (даже значительного) скоро-

сти в малом числе точек-либо ТВС. Поэтому необходимо разрабатывать методы оценки поканальной скорости теплоносителя. Она также может быть рассчитана по измерению температуры ТН на выходе ТВС, температуры в холодных петлях, перепаду давления на АХЗ и аксиального энерговыделения в ТВС. Обеспечить метрологически такую методику хотя бы на уровне 3% относительной погрешности вряд ли возможно вследствие необходимости учета большого числа измерений. На высокие параметры точности претендует шумовой метод измерения скорости теплоносителя по флуктуационным составляющим сигналов ДПЗ, базирующийся на оценке времени запаздывания одного сигнала ДПЗ по отношению к другому.

В простейшем виде проблема TDE заключается в оценке параметра запаздывания τ_0 по реализациям двух случайных процессов $x(t)$, $y(t)$:

$$\begin{cases} x(t) = s(t) + n_1(t), \\ y(t) = x(t - \tau_0) + n_2(t) \end{cases} \quad (4.1)$$

Дополнительно предполагается, что составляющие процессов $x(t)$, $y(t)$ — сигнал $s(t)$ и шумы $n_1(t)$, $n_2(t)$ — попарно не коррелируют т.е.

$$M[xs] = M[sn_1] = M[n_1n_2] = 0$$

где M — операция математического ожидания. Тогда авто- и взаимные функции (корреляционные функции) и их Фурье образы (АСПМ и ВСПМ) имеют следующий вид:

$$\begin{cases} K_x(t) = K_s(t) + K_{n_1}(t) \\ K_y(t) = K_s(t) + K_{n_2}(t) \\ K_{xy}(t) = K(t - \tau_0) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} G_x(f) = G_s(f) + G_{n_1}(f) \\ G_y(f) = G_s(f) + G_{n_2}(f) \\ G(f) = G(f) \exp(-j2\pi f\tau_0) \end{cases}$$

Во временной области (рис.4.1) искомый параметр τ_0 отыскивается как аргумент глобального максимума ВКФ $K_{xy}(t)$:

$$\tau_0 = \arg\left\{\max_t K_{xy}(t)\right\} \quad (4.2)$$

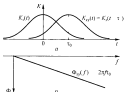


Рис. 4 | АКФ ВКФ (а) и фаза ВСПМ (б) в аддитивном смещении

в частотной области — через наклон фазы ВСПМ $\Phi_{xy}(f)$

$$\tau_0 = -\frac{1}{2\pi f} \Phi_{xy}(f) \quad (4.3)$$

Уже из данного элементарного рассмотрения видно, что временной подход опосредован свойствами сигнала. Точность определения параметра τ_0 по значению максимума ВКФ $K_{xy}(t)$ зависит от того, насколько максимум разрешен во времени: является ли он узким или широким. Вид функции $K_{xy}(t)$ определяется свойствами процесса $x(t)$, который может быть узкополосным и низкочастотным, т. е. его АКФ будет обладать пологим и плохо разрешенным глобальным максимумом. В спектральном выходе все авто свойства сигнала заключены в модуле ВСПМ, а информация о τ_0 (взянная) — только в фазе ВСПМ.

Рассмотрим ВКФ-метод в частотной области

$$\begin{aligned} K_{xy} &= F^{-1} [G_{xy}(f)] = F^{-1} \left[|G_{xy}(f)| \exp(-j2\pi f \tau_0) \right] = \\ &= F^{-1} \left[G_x(f) \exp(-j2\pi f \tau_0) \right] = F^{-1} [G_x(f)] \otimes F^{-1} [\exp(-j2\pi f \tau_0)] \\ &= K_x(t) \otimes \delta(t - \tau_0) = K_x(t - \tau_0) \end{aligned}$$

Переходы от одного равенства в последних формулах к другому тривиальны:

— первое равенство — определение ВКФ через ВСПМ (ил. теорема Винера—Хинчина);

второе — представление ВСПМ через модуль и фазу (экспоненциальный вид);

третье — подстановка конкретного вида модуля и фазы

четвертое — теорема о свертке;

пятое — согласно тому, что обратное преобразование Фурье от комплексной экспоненты есть δ -функция.

Идеальное выделение параметра t_0 осуществляется именно с помощью δ -образной ВКФ, которая обладает максимально возможным временным разрешением: $K_{\text{вкф}}(t) = \delta(t - t_0)$. Поэтому последняя операция свертывания лишь ухудшает точность оценки t_0 . В данном случае информация об автокорреляционных сигналах, поставленная корреляционным анализом не только избыточна, но и вредна.

В качестве альтернативы ВКФ-методу впервые в реакторно-шумовых приложениях выступил резонанс — обратное Фурье-преобразование комплексной когерентности:

$$R_{\text{вкф}}(t) = F^{-1} \left[G_{\text{вкф}}(f) \exp(-j2\pi\Phi_{\text{вкф}}(f)) \right] \quad (4.4)$$

В работах [5, 6] его превосходство над ВКФ доказывалось в модельном эксперименте.

Параллельно с резонансом стали применять импульсную характеристику $h(t)$ [1]. Эта функция времени связывает входной процесс $x(t)$ с выходным процессом $y(t)$ с помощью следующего выражения:

$$y(t) = \int_0^t h(\tau) x(t - \tau) d\tau \quad (4.5)$$

Или на частотном языке, используя теорему о свертке, имеем

$$Y(f) = H(f) X(f)$$

где $H(f) = F^{-1} \{ h(t) \}$

В случае системы с одним входом $x(t)$ и одним выходом $y(t)$ передаточная функция $H(f)$ связана с ВСПМ $G_{yy}(f)$ и АСПМ $G_{xx}(f)$ формулой:

$$H(f) = G_{yy}(f)/G_{xx}(f)$$

Тождественными преобразованиями выведем из последнего равенства функцию когерентности

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_x(f)} = \frac{G_{xy}(f)}{\sqrt{G_x(f)}\sqrt{G_x(f)}} \cdot \frac{\sqrt{G_x(f)}}{\sqrt{G_x(f)}} = \Gamma(f) \frac{\sqrt{G_x(f)}}{\sqrt{G_x(f)}}$$

Существенно, что здесь функция когерентности — комплексная, так же, как и в определении резонанса (4.4). Теперь импульсная характеристика будет иметь вид

$$h(t) = F \left[\Gamma(f) \frac{\sqrt{G_x(f)}}{\sqrt{G_x(f)}} \right] = F^{-1}[\Gamma(f)] \otimes F \left[\frac{\sqrt{G_x(f)}}{\sqrt{G_x(f)}} \right] =$$

$$R_{\Gamma}(t) \otimes F \left[\frac{\sqrt{G_x(f)}}{\sqrt{G_x(f)}} \right] \quad (4.6)$$

Таким образом, импульсная характеристика есть свертка с резонансом, и совпадает с ним только при совпадении АСПМ сигналов $x(t)$ и $y(t)$. В других случаях операция свертки, уменьшая разрешение, делает импульсную характеристику хуже резонанса (как средство для выделения τ_d).

4.2 Влияние неидеальности датчиков на оценку времени запаздывания

Пусть процесс $x(t)$ измеряется с помощью датчика, который имеет передаточную функцию в виде звена 1-го порядка

$$W(\omega\tau) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

Это означает, что в спектральной области вместо процесса $X(\omega)$, где $X(\omega)$ — преобразование Фурье измеряемого процесса $X(\omega) = F[x(t)]$ будет наблюдаться процесс

$$Y(\omega) = W(\omega\tau)X(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}X(\omega)$$

Величина τ — так называемая постоянная времени датчика — связана с характерным временем преобразования измеряемого

процесса $x(t)$ в сигнал датчика $y(t)$. Задача идентификации параметра τ может быть сведена к задаче вычисления времени запаздывания. При $\omega\tau \ll 1$ (т.е. на достаточно низких частотах и/или при малых постоянных времени) имеем следующие приближенные равенства:

$$\frac{1}{1 + j\omega\tau} \approx 1 - j\omega\tau \exp(-j\omega\tau)$$

Передаточная функция в виде комплексной экспоненты описывает «чистое» (без затухания амплитуды) запаздывание выходного сигнала по отношению к входному: $y(t + \tau) = x(t)$ или в спектральной области

$$Y(\omega)\exp(-j\omega\tau) = X(\omega)$$

ВСПМ процессов $y_1(t)$, $y_2(t)$ по определению записывается в виде

$$G_{12}(\omega) = M \left| Y(\omega) Y_2^*(\omega) \right|$$

где M — знак математического ожидания, $*$ — знак комплексного сопряжения.

С учетом запаздывания имеем

$$G_{12}(\omega) = \exp[-j\omega(\tau_2 - \tau_1)] M \left| X(\omega) X_2^*(\omega) \right| = \exp[-j\omega(\tau_2 - \tau_1)] G_{x,x}(\omega)$$

Таким образом, при $\omega\tau \ll 1$ инерционность двух датчиков не влияет только фазовую характеристику и оставляет неизменным модуль ВСПМ измеряемых процессов. Причем к истинной фазе $\varphi_{x,x}(\omega)$ добавляется линейная зависимость $\omega(\tau_2 - \tau_1)$

$$\varphi_{12}(\omega) = \varphi_{x,x}(\omega) + \omega(\tau_2 - \tau_1) \quad (4.7)$$

Если между исследуемыми случайными процессами существует транспортное запаздывание τ_0 , т.е. фаза описывается линейной зависимостью $\varphi_{x,x}(\omega) = \omega\tau_0$, то инерционность датчиков приведет к систематической погрешности $\omega(\tau_2 - \tau_1)$

$$\varphi_{12}(\omega) = \omega(\tau_0 + \tau_2 - \tau_1) \quad (4.8)$$

ВКФ рассматриваемых случайных процессов как обратное Фурье преобразование от ВСПМ будет иметь вид

$$K_2(\tau) = F^{-1}[S_2(\omega)] = F^{-1}[\exp\{-j\omega(\tau_2 - \tau_1)\}] \otimes F^{-1}[S_{x,x}(\omega)] = \delta(\tau_2 - \tau_1) \otimes F^{-1}[S_{x,x}(\omega)] = \delta(\tau_2 - \tau) \otimes K_{x,x}(\tau) = K_{x,x}(\tau_2 - \tau) \quad (4.9)$$

Таким образом, глобальным максимум ВКФ будет смещен по абсциссе на величину $\tau = \tau_2 - \tau_1$, что является систематической погрешностью при определении времени запаздывания двух случайных процессов. Очевидно, при тождественности двух измерительных трактов (в частности, при равенстве постоянных времени двух датчиков) не будет неказаться ни ВКФ ни фазовая характеристика ВСПМ.

Если взаимная характеристика строится на сигналах датчиков различной физической природы, один из которых безынерционен, то выражения (4.8, 4.9) дают способ оценки постоянной времени второго инерционного датчика. В качестве такой пары можно выбрать два нейтронных датчика, один из которых мгновенный (например, ИК или камера деления), а другой — с запаздыванием (например, ДПЗ — имеющий кроме мгновенного компонента еще и запаздывающие компоненты), или в качестве инерционного датчика можно выбрать термоспару. Важно, чтобы при этом существовали ненулевые корреляции между измеряемыми сигналами. Периодическая оценка постоянной времени инерционного датчика является способом его диагностирования. Если исключить тривиальные случаи короткого замыкания и холостого хода (обрыва) измерительных линий, то все другие причины деградации датчика связаны с немгновенным изменением его постоянной времени.

Итак, взаимные характеристики (ВКФ, фаза ВСПМ) несут информацию о постоянных времени датчиков. Однако обладая только взаимными характеристиками, нельзя вычислить абсолютные значения этих постоянных времени датчиков. Например, если для трех датчиков с постоянными времени τ_1, τ_2, τ_3 соответственно вычислены их три возможные взаимные характеристики из которых получены три возможные разности между тремя постоянными времени — то можно получить три следующих линей

но зависящих уравнений

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + A \\ \tau_1 - \tau_2 = B \\ \tau = \tau_1 = C \end{cases}$$

Достаточно знать постоянную времени хотя бы одного датчика чтобы вычислять постоянные времени двух других. Точность оценки параметра τ_0 по абсциссе максимума ВКФ зависит также и от дискретизации Δt . По самым грубым оценкам данная составляющая погрешности имеет вид $\tau_0 \pm \Delta t$. Иными словами, место положения максимума ВКФ на оси времени определяется с точностью до одного дискрета влево и вправо от максимума. Отсюда очевидно требование $\tau_0 \gg \Delta t$. В свою очередь частота дискретизации f_d связана с верхней частотой рабочего диапазона F_p теоремой Котельникова: $1/\Delta t = f_d \geq F_p/2$. В результате условие, минимизирующее составляющую погрешности, обусловленной дискретным представлением исходных процессов, будет иметь следующий простой вид: $1/\tau_0 \ll F_p/2$. Это означает, что на длине рабочего диапазона частот $[0 \dots F_p]$ должно уложиться достаточно много смежных интервалов длиной $1/\tau_0$.

4.3 Принципы построения спектральных методов

В работе [1] приводится единая схема, которая описывает различные подходы к проблеме TDE (рис. 4.2).



Рис. 4.2 Схема обобщенного корректора

В результате ее применения выходная функция имеет вид

$$K_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} H_1(f) H_2^*(f) G_{xy}(f) \exp(j2\pi f\tau) df \quad (4.10)$$

где функцию

$$W(f) = H_1(f) H_2^*(f) \quad (4.11)$$

называют передаточной функцией (фильтром) спектрального метода. Очевидно, что при $W(f)=1$ функция $K_{xy}(\tau)$ есть обычная ВКФ. При

$$W(f) = \frac{|\Gamma_{xy}(f)|}{|G_{xy}(f)|} = \frac{1}{\sqrt{G_x(f) G_y(f)}}$$

получаем реосанс.

Схема (см. рис. 4.2) выявляет суть спектральных методов — привлечение дополнительной априорной информации в виде спектральных вероятностных характеристик процессов $x(t)$, $y(t)$. Тождество $W(f)=1$ (ВКФ-метод) соответствует случаю отсутствия априорных сведений. Отсюда следует, что в идеале спектральные методы привлекающие дополнительные априорные сведения не должны быть хуже ВКФ-метода.

С помощью схемы на рис.4.2 легко трактуется преобразование, осуществляемое реосансом: перед коррелированием процесс $x(t)$ пропущен через фильтр с передаточной функцией $H_1(f) = 1/\sqrt{G_x(f)}$, а процесс $y(t)$ — через фильтр $H_2(f) = 1/\sqrt{G_y(f)}$. Эти действия соответствуют выбеливанию процессов, а ВКФ двух белых шумов — δ функция — идеальный случай ВКФ. Теперь АСПМ процессов на входе коррелятора не будут зависеть от частоты

$$\begin{aligned} G_x(f) &= M\left[\left|F[u(t)]\right|^2\right] - M\left[\left|F[x(t)]\right|^2 - H^2(f)\right] = H^2(f) G_x(f) - \\ &= \left(\frac{1}{\sqrt{G_x(f)}}\right)^2 G_x(f) = G_x(f) = 1 \end{aligned}$$

Таким образом, аннулируются специфические свойства процессов $x(t)$, $y(t)$ и глобальный максимум выходной функции $K_{xy}(\tau)$

имеет вид приближенный к δ образному. В рамках модели глобального зашумления

$$R_{x_{ij}}(t) = F \left[\frac{G_2(f)}{\sqrt{[G_3(f) + G_{n_1}(f)][G_3(f) + G_{n_2}(f)]}} \exp(-j2\pi f\tau_0) \right] \\ \delta(t - \tau_0) \otimes F^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{(1 + \alpha_1)(1 + \alpha_2)}} \right]$$

где $\alpha_i = G_{n_i}/G_2$, $i = 1, 2$.

В отсутствие мешающих шумов $n_1(t)$, $n_2(t)$ получается, что $|G_{ij}(f)| = \text{const}$ и таким образом достигается идеальный случай:

$$R_{x_{ij}}(t) = \text{const} \cdot \delta(t - \tau_0)$$

Передаточные функции любого спектрального метода конструируются из трех спектральных плотностей: G_x , G_y , G_{xy} . Формально они должны быть известны априори. На практике данное требование нереализуемо, и спектральные плотности заменяются их оценками, что ухудшает качество оценки времени запаздывания.

Получается сложная вычислительная процедура (рис. 4.3), в результате которой над исходными процессами совершаются два нелинейных преобразования и два Фурье-преобразования (прямое и обратное). Фурье-преобразование $F[x]$ и первое нелинейное преобразование $\Phi_1(F[x], F[y])$ соответствуют оценке спектральных плотностей прямым способом по реализациям случайных процессов $x(t)$, $y(t)$, второе нелинейное преобразование — $\Phi_2(G_x, G_y, G_{xy})$ — получению передаточной функции спектрального метода. После обратного Фурье-преобразования $F^{-1}[\Phi_2]$ имеем временную функцию, обобщающую ВКФ.

4.4. Феноменологическая модель внутризонного нейтронного шума ВКЭР

4.4.1. Общие положения

Для внутризонных нейтронных измерений модель запаздывания аналогична модели (4.1):

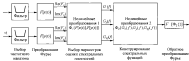


Рис. 4. Блок-схема системы с двумя каналами и двумя нелинейными блоками

$$\begin{cases} x(t) = \dot{h}(t) + g(t) + n_0(t) \\ y(t) = \dot{h}(t - \tau_0) + g(t) + n_2(t) \end{cases} \quad (4.12)$$

где $x(t)$, $y(t)$ — измеряемые сигналы, трактуемые как сигналы двух ДПЗ, расположенных в одной ТВС; $g(t)$ — глобальный компонент НШ, дающий одинаковый в статистическом смысле вклад в оба измеряемых процесса; $\dot{h}(t)$ — локальный компонент, транспортируемый со скоростью ТН ($V_{\text{тн}}$), $\dot{h}(t)$ — общепринятое обозначение локального нейтронного шума, имеющее тот же смысл, что и общепринятое в проблеме ТДБ обозначение сигнала $\dot{h}(t)$ в модели (4.1); τ_0 — время прохода теплоносителя расстояния от точки z_k (места установки ДПЗ с номером k) до точки z_m (места установки ДПЗ с номером m) со скоростью $V_{\text{тн}} = |z_k - z_m|/\tau_0$; $n_1(t)$, $n_2(t)$ — прочие, как правило, некоррелированные шумы.

Для случая внутризонных нейтронных измерений существуют как физические источники некоррелированного шума, так и аппаратные (как и для любых других измерений). Если измерительные шумовые тракты ДПЗ построены грамотно (т.е. аппаратный некоррелированный компонент мал по мощности), то физические источники некоррелированного компонента много меньше по мощности и локального, и глобального компонентов. Пренебрегая некоррелированным компонентом, получим

$$\begin{cases} x(t) = \dot{h}(t) + g(t), \\ y(t) = \dot{h}(t - \tau_0) + g(t) \end{cases} \quad (4.13)$$

ВКФ в отличие от простейшей модели будет состоять из двух слагаемых:

$$K_{xy}(\tau) = K_g(\tau) + K(\tau - \tau_0)$$

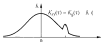


Рис. 4.4 ВКФ в модели глобально-о-
диффузионной

где $K_g(\tau)$ — АКФ глобального шума; $K(\tau - \tau_0)$ — АКФ локального шума, сдвинутая по оси времени на основную величину τ_0 .

Абсцисса максимума ВКФ теперь уже может находиться в ну-

τ_0 (когда глобальный компонент превосходит локальный), а абсцисса локального максимума может быть смещена от τ_0 (рис. 4.4).

4.4.2 Спектральные характеристики процессов

В рамках феноменологической модели отыщем основные спектральные характеристики, чтобы построить методы оценки времени запаздывания при глобальном зашумлении.

ВСПМ измеренных процессов может быть получена как Фурье преобразование ВКФ (4.14)

$$G_{xy}(\omega) = \exp(-i\omega\tau_0) [G_I(\omega) + G_A(\omega)]$$

из которого вычисляют квадрат модуля ВСПМ

$$\begin{aligned} |G_{xy}(\omega)|^2 = G_I^2(\omega) \left\{ [\cos\omega\tau_0 + k(\omega)]^2 + \sin^2\omega\tau_0 \right\} \\ G^2(\omega) \left\{ 1 + k^2(\omega) + 2k(\omega)\cos\omega\tau_0 \right\} \\ - G^2(\omega) \left\{ \left[1 + k^2(\omega) \right]^2 - 4k(\omega)\sin^2\frac{\omega\tau_0}{2} \right\}, \end{aligned} \quad (4.15)$$

и фазу ВСПМ

$$\varphi_T(\omega) = \varphi_{G_{xy}}(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} G_{xy}(\omega)}{\operatorname{Re} G_{xy}(\omega)} = \operatorname{arctg} \frac{\sin\omega\tau_0}{\cos\omega\tau_0 + k(\omega)} \quad (4.16)$$

где Im , Re — мнимая и действительная части ВСПМ

Как следует из (4.16) фаза будет линейна и иметь наклон $2\pi\tau_0$ только при тождественно нулевом глобальном компоненте $k(\omega) = 0$

$$\varphi_T(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\sin\omega\tau_0}{\cos\omega\tau_0} = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\omega\tau_0) = \omega\tau_0$$

Во всех других случаях линейной аппроксимации фазы будут получены ошибочные оценки τ_0 , и погрешность будет тем больше, чем больше глобальный компонент. Есть один особый случай зашумления — когда глобальный компонент в точности равен локальному, т.е. $k(\omega) = 1$. В этом случае фаза будет линейной (по

мимо основного случая $k(\omega) = 0$), но с вдвое меньшим наклоном чем в отсутствие глобального зашумления:

$$\varphi_1(\omega) = \arctg \frac{\sin \omega \tau_0}{\cos \omega \tau_0 + 1} = \arctg \frac{2 \sin \frac{\omega \tau_0}{2} \cos \frac{\omega \tau_0}{2}}{2 \cos^2 \frac{\omega \tau_0}{2}} = \arctg(\operatorname{tg} \omega \tau_0 / 2) = \omega \tau_0 / 2.$$

Казалось бы, помимо наклона прямой, есть и другие признаки, по которым можно извлечь искомое время τ_0 , например, из характерных значений фазы (0 и π) фаза периодически пересекает ось частот в точках

$$f = \frac{1}{2\tau_0}$$

— 0, 1, 2 ... (там где $\sin \omega \tau_0 = 0$) и периодически терпит разрыв в точках

$$f = \left(\frac{1}{2} + i \right) \frac{1}{2\tau_0}$$

0, 1, 2, ... (там, где $\cos \omega \tau_0 = 0$ при $k(\omega) = 0$). Однако это справедливо только для низкого уровня глобального шума, намного меньшего, чем локальный компонент. В противном случае, который и наблюдается чаще всего на практике, фаза на всей частотной оси практически равна нулю, и никаких особых точек на ней выявить нельзя.

В выражении для модуля ВСПМ (4.15) присутствует периодический компонент

$$[1 + k(\omega)]^2 = 4k(\omega) \sin^2 \frac{\omega \tau_0}{2}$$

из которого, казалось бы, можно извлечь параметр τ_0 . Действительно, функция ВСПМ модулирована синусоидой с периодом, зависящим от τ_0 . Однако и здесь глобальный компонент в виде функции $k(\omega)$ искажает картину синусоидальной модуляции. При большом глобальном шуме, во-первых, синусоидальный член очень мал (т.е. очень мала глубина модуляции), во-вторых, функция $k(\omega)$ не обязательно монотонная и гладкая, что исключает само периодичность ВСПМ.

Из АСПМ и ВСПМ может быть найдена комплексная когерентность по определению

$$\Gamma(f) = R(f) + jI(f) = \frac{G_x(f)}{\sqrt{G_x(f)G_y(f)}} = \\ = \frac{k(f) + \exp(-j2\pi f t_0)}{k(f) + 1} = 1 - \frac{1 - \exp(-j2\pi f t_0)}{k(f) + 1} \quad (4.17)$$

где

$$R(f) = 1 - \frac{1 - \cos \alpha(f)}{k(f) + 1}$$

— действительная часть комплексной когерентности

$$I(f) = \frac{\sin \alpha(f)}{k(f) + 1}$$

— мнимая часть комплексной когерентности

$$\alpha(f) = \omega t_0 = 2\pi f t_0$$

Отсюда квадрат модуля когерентности имеет вид

$$|\Gamma(f)|^2 = R^2(f) + I^2(f) = 1 - \frac{4k(f)}{[k(f) + 1]^2} \sin^2 \frac{\alpha(f)}{2} \quad (4.18)$$

Данная функция модулирована той же синусоидой, что и ВСПМ, но глубиной модуляции ниже. Ее зависимость от отношения сигнал/шум (от $k(f)$) нелинейная

$$|\Gamma(f)| \begin{cases} = 1 & k(f) \rightarrow 0 \\ 1 - 4k(f) \sin^2 \frac{\alpha(f)}{2} & k(f) \ll 1 \\ \cos^2 \frac{\alpha(f)}{2} & k(f) \approx 1 \\ 1 - \frac{4}{k(f)} \sin^2 \frac{\alpha(f)}{2} & k(f) \gg 1 \\ = 1 & k(f) \rightarrow \infty \end{cases} \quad (4.19)$$

В двух крайних случаях — в отсутствие глобального зашумления при $k(f) = 0$ и локального транспортного компонента при $k(f) \rightarrow \infty$ — измеряемые сигналы $x(f)$ и $y(f)$ абсолютно коррелированы, $\Gamma(f) = 1$. В первом случае корреляции происходят по локальному компоненту, во втором — по глобальному. Во всех других промежуточных случаях присутствуют ненулевые модуляции функции когерентности. Глубина модуляции очень мала, если очень мал глобальный компонент (зашумление)

$$\Gamma^2(f) \approx 1 - 4k(f)\sin^2 \frac{\alpha(f)}{2} \quad k(f) \ll 1$$

или очень мал локальный компонент (зашумление Воланко)

$$\Gamma^2(f) \approx 1 - \frac{4}{k(f)}\sin^2 \frac{\alpha(f)}{2} \quad k(f) \gg 1$$

Максимально возможная глубина модуляции для функции когерентности, изменяющейся в пределах $[0, 1]$, равна единице [$k(f) = 1$] и достигается при тождественном равенстве глобального и локального компонентом:

$$\Gamma^2(f) = \cos^2 \frac{\alpha(f)}{2} \quad (4.20)$$

Таким образом, функция когерентности при определенных соотношениях между локальным и глобальным компонентами может быть предпочтительнее для выделения параметра τ_b , чем ВСПМ.

4.4.3 Реосанс в модели глобального зашумления

В связи с особыми свойствами реосанса и широким применением его в реакторно-шумовых приложениях, рассмотрим отдельно возможности реосанса в модели глобального зашумления. Реосанс как «выбеливающая» функция специально не предназначен для того, чтобы быть помехоустойчивым по отношению к глобальному компоненту. Однако в работе [5] на основе модельного эксперимента утверждается именно это качество реосанса. Покажем аналитически, в каких случаях данное утверждение верно. Подставим в определение реосанса выражение для комплексной когерентности в модели глобального зашумления

$$A_{\Sigma}(\tau) = F \cdot \left\{ \left[1 - \frac{1}{k(f)+1} \right] + \left[\frac{\exp(-j2\pi f\tau_0)}{k(f)+1} \right] \right\} =$$

$$\begin{cases} \delta(\tau - \tau_0) & k(f) = 0 \\ \frac{1}{2} \delta(\tau) + \frac{1}{2} \delta(\tau - \tau_0) & k(f) = 1 \\ \delta(\tau) + F^{-1} \left\{ \frac{1}{k(f)} \right\} \otimes \delta(\tau - \tau_0) & k(f) \gg 1 \\ C [\delta(\tau) + \delta(\tau - \tau_0)] & k(f) = \text{const} \gg 1 \end{cases}$$

где C — константа.

Как и для ВКФ, ненулевым глобальным компонентом обуславливается локальный максимум функции при $\tau = 0$ (δ -функция) увеличивающийся по мере роста глобального компонента. Пока шумление не очень велико ($0 \leq k(f) \leq 1$) максимум в искомом точке τ_0 по своей амплитуде не меньше максимума при $\tau = 0$.

$$R_{\Sigma}(\tau) = \frac{1}{2} \delta(\tau) + \frac{1}{2} \delta(\tau - \tau_0) \quad k(f) = 1$$

Для случая ВКФ равенство глобального и локального компонентов давало тот же результат с тем лишь различием, что реосанс позволяет выделять локальные максимумы на уровне δ об-разных функций.

Дальнейший рост глобального компонента приводит к трем не желательным эффектам. во-первых, растет δ функция в нуле, во-вторых, падает по амплитуде слагаемое, содержащее τ_0 -информацию и, в-третьих, локальный максимум в точке τ_0 перестает быть δ образным. Действительно, τ_0 -информация извлекается из слагаемого представляющего собой свертку очень малой по модулю функции $|F^{-1}\{1/k(f)\}| \ll 1$ с δ -функцией. Слагаемое в котором заложе-на информация о τ_0 , будет значительно уступать по амплитуде «гло-бальному» слагаемому. Упомянутая выше свертка «размывает» ло-кальный максимум в точке τ_0 , что уподобляет реосанс взаимной кор-реляционной функции. Более того, свертка может порождать и дру-гие локальные максимумы помимо максимума в точке τ_0 , или даже сдвигать этот максимум по оси времени. Конечный итог влияния гло-бального компонента на реосанс будет зависеть от конкретного ви-да функции $k(f)$.

Если предположить, что локальный и глобальный компоненты — белые шумы $[k(f) = \text{const}]$, то каково бы ни было глобальное зашумление, итог будет один и тот же

$$R_{x_{\text{гп}}}(\tau) = \text{const} [\delta(\tau) + \delta(\tau - \tau_0)] \text{ при } k(f) = \text{const и } k(f) \gg 1$$

т.е. процесс помехоустойчив к глобальному зашумлению: глобальный и локальный компоненты всегда удерживаются примерно в равных пропорциях. Отсюда, впрочем, не следует, что в других случаях процесс не обладает какой-либо помехоустойчивостью по отношению к глобальному компоненту. Например, для монотонных, медленно изменяющихся по частоте функций $k(f)$ он будет сохранять некоторые свойства помехоустойчивости

4.4.4. Спектральные функции, не зависящие от глобального зашумления

В рамках модели глобального зашумления все приведенные выше функции зависят от соотношения шум/сигнал $k(f)$ и таким же образом от него будет зависеть и качество оценки параметра τ_0 . В [3] предложена функция, не зависящая от $k(f)$. Ее вид непосредственно следует из вида комплексной когерентности: если из обеих частей равенства (4.17) вычесть единицу

$$\Gamma(f) - 1 = R(f) - 1 + I(f) = - \frac{1 - \exp(-j2\pi f \tau_0)}{k(f) + 1}$$

получим комплексную функцию $\Gamma(f) - 1$ фаза которой не зависит от $k(f)$

$$\begin{aligned} \varphi_{\Gamma}(f) &= \arctg \left[I(f)/R(f) - 1 \right] = \arctg \frac{\frac{\sin[\alpha(f)]}{k(f)+1}}{\frac{1 - \cos[\alpha(f)]}{k(f)+1}} = \\ &= \arctg \frac{2 \sin \left[\frac{\alpha(f)}{2} \right] \cos \left[\frac{\alpha(f)}{2} \right]}{2 \sin^2 \left[\frac{\alpha(f)}{2} \right]} = \left[\frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha(f)}{2}} \right] \end{aligned} \quad (4.22)$$

где

$$I(f) = \frac{\sin[\alpha(f)]}{k(f)+1}$$

— минимальная часть комплексной когерентности, совпадающая с мнимой частью функции $\Gamma(f) = 1$

$$R(f)-1 = -\frac{1 - \cos[\alpha(f)]}{k(f)+1}$$

— действительная часть комплексной когерентности без единицы
Таким образом, имеем простое соотношение

$$\operatorname{tg} \varphi_{\Gamma-1}(f) = \operatorname{ctg} [\alpha(f)/2] = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} \right) \quad (4.23)$$

откуда

$$\varphi_{\Gamma-1}(f) = \pi/2 + \alpha(f)/2 = \pi/2 + \pi f \tau_0 \quad (4.24)$$

Для сравнения напомним выражение для тангенса фазы ВСПМ (или фазы комплексной когерентности)

$$\operatorname{tg} \varphi_{\Gamma}(f) = \frac{\sin \alpha(f)}{k(f) + \cos \alpha(f)}$$

Полученные фазовые характеристики представлены на рис. 4.5. Как было показано выше, только в трех случаях $\varphi_{\Gamma}(f)$ представляет собой линейную зависимость

в отсутствие глобального зашумления ($k=0$), $\varphi_{\Gamma}(f) = \alpha(f) = 2\pi f \tau_0$
при тождественном равенстве глобального и локального компонентов ($k=1$), $\varphi_{\Gamma}(f) = \alpha(f)/2 = \pi f \tau_0$;
при глобальном зашумлении, стремящемся к бесконечности ($k \rightarrow \infty$), когда $\varphi_{\Gamma}(f) = 0$

Во всех других случаях, которые и являются практическими, фаза представляет собой нелинейную зависимость от $k(f)$.

Полученная выше фаза $\varphi_{\Gamma-1}(f)$ не зависит от $k(f)$ и всегда линейна, т.е. обладает свойством инвариантности по отношению к глобальному зашумлению. Чтобы получить временную функцию с таким же свойством (функцию, обобщающую ВКФ, но независимую от $k(f)$), воспользуемся стандартным приемом (обратным

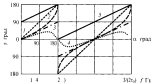


Рис. 4.5. Фаза сложной спектральной плотности $\varphi_T(\omega) = \arctg \{ [\sin \omega\tau_0] / \cos \omega\tau_0 + k/\omega\}$ для разных уровней глобального зашумления (1 — $k=0$; 2 — $k<1$; 3 — $k=1$; 4 — $k>1$) и фаза $\varphi_{T-1}(f) = \pi/2 + \pi f/\tau_0$, не зависящая от уровня глобального зашумления (5)

преобразованием Фурье)

$$F \{ \exp[j(2\varphi_{T-1}(f) - \pi)] \} = F \{ \exp(-j\omega(f)) \} \\ F \{ \exp(-j2\pi f\tau_0) \} = \delta(\tau - \tau_0) \quad (4.25)$$

Найдем вид передаточных функций $H_1(f)$, $H_2(f)$, соответствующих фильтрам, через которые необходимо пропустить процессы $x(t)$, $y(t)$, чтобы по спектральному обобщению ВКФ (4.10) получить выведенный новый спектральный метод. Для этого необходимо так подобрать функции $H_1(f)$, $H_2(f)$, чтобы обобщенная ВКФ

$$K_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} H_1(f) H_2^*(f) |G_{xy}(f)| \exp[-j\varphi_T(f)] df \quad (4.26)$$

приняла вид

$$K_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j(2\varphi_{T-1}(f) - \pi)] df \quad (4.27)$$

В известных спектральных методах описанных в разд. 1.5 функции $H_1(f)$, $H_2(f)$ подбирали по амплитудным свойствам (по виду их модулей), а фазовые характеристики не учитывали. Поэтому чаще всего при использовании метода предполагали, что более высокий вес имеют те частотные диапазоны, где фазы линейны. Функция $\varphi_{T-1}(f)$ будучи фазой по определению может

быть получена как результат фазовых преобразований при фильтрации процессов $x(t)$, $y(t)$. Приравнявая фазы левой и правой частей (4.26) и (4.27) друг к другу получаем

$$\frac{\varphi_T}{2} + \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_H - \varphi_N}{2} = \varphi_T + \quad (4.28)$$

Пусть процессы $x(t)$, $y(t)$ фильтруются совпадающими по модулю передаточными функциями $|H_1(f)| = |H_2(f)|$ и с равными, но имеющими противоположные знаки фазами $\varphi_N(f) = -\varphi_H(f)$ тогда из (4.28) имеем

$$|\varphi_N(f)| - |\varphi_H(f)| = \frac{\alpha(f)}{2} - \frac{1}{2} \arctg \frac{\sin \alpha(f)}{k(f) + \cos \alpha(f)} \quad (4.29)$$

Таким образом данный спектральный метод сводится к фазовой коррекции исходных сигналов $x(t)$, $y(t)$ по отношению друг к другу так, чтобы на любой частоте удовлетворялось равенство (4.29). Оно является трансцендентным выражением в котором фазовая фильтрация происходит с учетом глобального зашумления. Получается, что фильтры $H_1(f)$, $H_2(f)$ как будто бы априори «знают» частотную характеристику зашумления $k(f)$ и производят фазовую коррекцию исходных сигналов $x(t)$, $y(t)$ в соответствии с ней. Очевидно, такой вид фильтрации соответствует привлечению новых априорных сведений, т.е. улучшает обобщенную ВКФ по сравнению с традиционной ВКФ по отношению к выделению времени запаздывания при глобальном зашумлении. Очевидно также, что реализовать на практике такие фильтры не зная априори $k(f)$, невозможно.

В отсутствие зашумления [$k(f) = 0$] никакой фазовой коррекции не производят (рис. 4.6). При малых уровнях зашумления [$k(f) < 0$] угол коррекции не превосходит $\pi/2$ в особых точках $1/2T_0$, $1/T_0$, $3/2T_0$ коррекцию не производит. При равенстве глобального и локального компонентов [$k(f) = 1$] фазовый набег между процессами $x(t)$, $y(t)$ является линейной функцией частоты. Это тот редкий случай, когда пропадает свойство трансцендентности равенства (4.29) из-за того, что арктангенс вырождается в линейную функцию. Линейность фазы достигается если каждый из процессов $x(t)$

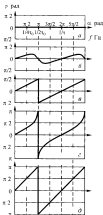


Рис. 4.6 Фазочастотная коррекция исключившей глобальной компонент

$$\left\{ \varphi_{\alpha} \right\} = \left\{ \varphi_{\alpha} \right\} \quad (\alpha = 2) \quad (1/2) \arctg \frac{\sin \alpha}{k + \cos \alpha}$$

$$a \quad k = 0 \quad b \quad k < 1 \quad c \quad k = 1 \quad d \quad k > 1 \quad e \quad k \gg 1$$

$y(t)$ пропустить звеном так называемого «чистого» запаздывания, передаточная функция которого — комплексная экспонента. Это редкий случай непосредственной реализуемости фильтров $H_1(f)$, $H_2(f)$, который применим только при $k(f) = 1$.

Максимальные фазовые коррекции вносятся при доминировании глобального компонента [$k(f) > 1$]. Его воздействие компенсируется, если в особых точках $1/2\tau_0$, $3/2\tau_0$, ... сигналы $x(t)$, $y(t)$ привести к противофазе, а в точках $1/\tau_0$, $2/\tau_0$, ... — к фазе, т.е.

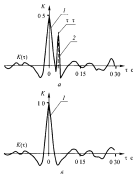


Рис. 4.7. Взаимная корреляционная функция при глобальном зашумлении $k(f) = 1$ (а) и $k(f) = 100$ (б);

1 — максимум глобального компонента, 2 — максимум локального компонента

после довольно сложных фазочастотных преобразований. Для экспериментального подтверждения эффективности того или иного способа оценки параметра τ_0 численно генерируем процессы $x(t)$, $y(t)$, удовлетворяющие модели глобального зашумления. Высокую помехозащищенность функции $\lg[\varphi_{T-1}(f)]$ к уровню глобального зашумления по сравнению с традиционной взаимной корреляционной функцией демонстрируют рис. 4.7, 4.8.

На рис. 4.7 и 4.8 изображены оценки этих функций при имитации двух уровней глобального зашумления $k(f) = 1$ и $k(f) = 100$. На рис. 4.7 взаимная корреляционная функция имеет два локальных максимума, один из которых соответствует эффекту переноса с $\tau_0 = 0,04$ с, другой — глобальному эффекту с максимумом в нуле. При увеличении уровня зашумления в 100 раз локальный эффект пропадает. В этих же условиях кривая $\lg[\varphi_{T-1}(f)]$ существенным образом не меняется (см. рис. 4.8). В точке пересечения с осью ω

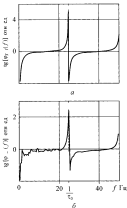


Рис. 4.8. Функция $\lg[\Phi_{T-1}(f)]$ при глобальном зашумлении $k(f) = 1$ (а) и $k(f) = 100$ (б). $1/\tau_0$ — местоположение асимптоты

стот ($1/\tau_0 = 25$ Гц) размещается асимптота, относительно которой слева и справа функция принимает большие значения с противоположными знаками, что благоприятно для оценки параметра τ_0 .

Формальная модель глобального зашумления (4.1) в явном виде не содержит аналитического описания нейтронно-теплогидравлических процессов, происходящих в активной зоне реактора. Уравнением (4.1) изначально постулируется, что шумовые неоднородности потока теплоносителя, переходящие в шумовые сигналы нейтронных внутризонных датчиков, транспортируются со средней скоростью. Строго говоря, это не так. Как будет показано ниже, из шумовой нейтронно-температурной модели активной зоны ВВЭР следует, что глобальный и локальный компонен

ты нейтронного шума взаимосвязаны. Поэтому ВСПМ сигнал двух ДПЗ состоит из глобального компонента G , двух комбинационных слагаемых, обусловленных взаимодействием глобальных и локальных компонентов $G - L_q$ и $G - L_p$ и слагаемого, возникающего вследствие взаимодействия локальных компонентов в точках z_q и z_p ($L_q - L_p$). Только последний компонент распространяется со скоростью потока теплоносителя, а комбинационные слагаемые имеют нулевую скорость. Это означает, что zink -частоты спектральных характеристик ДПЗ с номерами k и p могут систематически отклоняться от ожидаемых характерных значений по самой физической природе процессов, происходящих в активной зоне. Новая функция $\text{zink}[\varphi_{T-1}(f)]$ не защищает от такого вида систематической погрешности, так как комбинационные члены учитываются ею как локальные компоненты.

Однако оба комбинационных члена осциллируя, убывают с ростом частоты, что позволяет, начиная с некоторой частоты, пренебречь ими по сравнению с компонентом $(L_q - L_p)$.

Графическая интерпретация метода исключения глобального компонента. Взаимосвязь между $\varphi_{T-1}(f)$ и $\varphi_T(f)$ легче всего найти если совершить следующие геометрические построения. Когерентность как комплексная функция

$$\Gamma(f) = R(f) + jI(f) = \frac{1 - \exp[-j\alpha(f)]}{k(f) + 1}$$

может быть представлена на комплексной плоскости (Re , Im) в виде вектора данной $|\Gamma|$ (отрезок OB_1) с углом φ_T (рис. 4.9). Для на данного вектора переменна, так как функция когерентности зависит от частоты через функцию $\alpha(f) = 2\pi f \tau_d$. Например, при

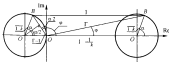


Рис. 4.9. Функция когерентности и фазовые характеристики $\varphi_{T-1}(f)$, $\varphi_T(f)$ на комплексной плоскости

$\alpha = 0$ когерентность достигает максимального значения $\Gamma = 1$, а при $\alpha = \pi$ — минимального $|\Gamma| = |1 - 2/(k+1)|$. Поэтому конец вектора когерентности (точка B_1) совершает круговое движение во круг точки O_1 с координатами $[1 - 1/(k+1), 0]$ и радиусом $1/(k+1)$. Комплексная экспонента $\exp[-j\alpha(f)]$ как известно описывает движение по единичной окружности.

Вычитание единицы из когерентности эквивалентно переносу центра окружности из точки O_1 в точку O_2 . Комплексная функция $\Gamma - 1$ описывается вектором OB с углом $\varphi_{\Gamma-1}(f)$. Теперь из равнобедренного треугольника OO_1B с углами $(\alpha, \pi/2 - \alpha/2, \pi/2 - \alpha/2)$ легко показать, что угол между вертикальной осью и хордой OB равен $\alpha/2$. Отсюда получаем графическое доказательство выражения $\varphi_{\Gamma-1}(f) = \pi/2 + \alpha(f)/2 = \pi/2 + \pi/ft_v$.

Треугольник OB_1B (рис. 4.10) полностью определен, в нем известны все углы $(\varphi_{\Gamma-1}(f) - \varphi_{\Gamma}(f), \varphi_{\Gamma}(f), \pi - \varphi_{\Gamma-1}(f))$ и длины всех сторон $(1, |\Gamma(f)|, |\Gamma(f) - 1|)$. Применяя любую из теорем взаимосвязи сторон и углов произвольного треугольника, получаем выражение

$$\operatorname{tg} \varphi_{\Gamma-1}(f) = \frac{|\Gamma| \cdot \sin \varphi_{\Gamma}(f)}{1 - |\Gamma| \cos \varphi_{\Gamma}(f)}$$

Это выражение можно получить еще проще, вычисляя тангенс угла $\varphi_{\Gamma-1}(f)$ по проекциям векторов $\Gamma(f)$, $\Gamma(f) - 1$:

$$\operatorname{tg}[\pi - \varphi_{\Gamma-1}(f)] = -\operatorname{tg} \varphi_{\Gamma-1}(f) = \frac{I}{R - 1} = \frac{|\Gamma| \cdot \sin \varphi_{\Gamma}(f)}{1 - |\Gamma| \cos \varphi_{\Gamma}(f)} \quad (4.31)$$

где $I = |\Gamma| \sin \varphi_{\Gamma}(f)$, $R = |\Gamma| \cos \varphi_{\Gamma}(f)$ — проекции вектора когерентности.

Изменение уровня глобального зашумления приводит к изменению положения центра окружности O и ее радиуса на рис. 4.11

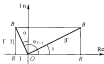


Рис. 4.10. Соотношения между углами $\varphi_{\Gamma-1}(f)$ и $\varphi_{\Gamma}(f)$ на комплексной плоскости

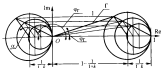


Рис. 4.11. Неизменность угла $\varphi_{\Gamma-1}(f)$ при изменении глобального зашумления

Очевидно, при этом изменяются и модуль когерентности $|\Gamma|$ и угол $\varphi_{\Gamma}(f)$. На рис. 4.11 изображены три уровня зашумления в виде трех окружностей. Наименьшая окружность соответствует максимальному зашумлению, так как при $k \rightarrow \infty$ радиус окружности стремится к нулю, а ее центр стремится к 1 на вещественной оси. Очевидно, при этом изменяется и модуль вектора $|\Gamma - 1|$, но как следует из рис. 4.11 его угол $\varphi_{\Gamma-1}(f)$ остается неизменным для любого зашумления.

Сравнивая рис. 4.5 и 4.11, несложно заметить, что фаза $\varphi_{\Gamma-1}(f)$ повторяет фазу $\varphi_{\Gamma}(f)$ для частного случая $k(f) = 1$ со сдвигом в $\pi/2$. Иными словами, каково бы ни было зашумление, преобразование $\Gamma \rightarrow \Gamma - 1$ эквивалентно приведению фазы $\varphi_{\Gamma-1}(f)$ к частно-

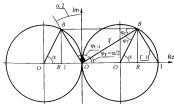


Рис. 4.12. Сопоставление между углами $\varphi_{\Gamma-1}(f)$ и $\varphi_{\Gamma}(f)$ на комплексной плоскости при $k(f) = \cos \alpha$

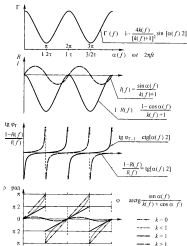


Рис. 4.13. Спектральные характеристики в модели глобального зашумления

ну случаю линейной фазы $\varphi_T(f)$ при $k(f) \equiv 1$.

Этому эффекту также есть графическое объяснение. При $k(f) \equiv 1$ окружность, соответствующая вектору Γ , соприкасается с мнимой осью Im справа, а окружность, соответствующая $\Gamma - 1$ при любом зашумлении соприкасается с данной осью слева (рис. 4.12).

Несложно доказать, что угол $\angle BOO_1 = \alpha/2 = \varphi_T(f)$ а отсюда что угол $\angle BOB = \pi/2$ или $\varphi_T(f) = \varphi_T(f) + \pi/2$ (только для случая $k(f) \equiv 1$).

На рис. 4.13 изображены графики спектральных функции с общей осью частот для самого простого случая $k(f) = \text{const}$, что гарантирует периодичность всех представленных функций. На практике данные функции, конечно, непериодические.

Список литературы

1. Павелко В.Н. Спектральные методы оценивания времени запаздывания в реакторно-шумовых исследованиях // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 1989. Вып. 2. С. 38—63.
2. Nishihara H., Kanishi H. A new correlation method for transit-time estimation // Prog. Nucl. Energy. 1977. Vol. 1. P. 219—225.
3. Павелко В.Н. Новые спектральные методы оценки времени запаздывания в реакторно-шумовых исследованиях // Атомная энергия. 1987. Т. 63. Вып. 4. С. 266—288.
4. Estimation of fuel inlet flow rate by noise analysis / N. Naito, Y. Ando, F. Yamamoto, E. Takeuchi // Nucl. Sci. Technology. 1980. Vol. 17. N 5. P. 351—358.
5. Beringer K., Kosaly G., Nishihara H. Theoretical remarks on a noise correlation method of transit time estimation // Atomkern-Energie. 1981. Bd 36(4). S. 292—296.
6. Joshi S.S., Arora K.K., Koparde R.V. Comparative study of measurement techniques for coolant transit times in a boiling water reactor using noise signals of LPRMs // Prog. Nucl. Energy. 1985. Vol. 15. P. 921—929.

Моделирование вибрации**5.1 Макетные и стендовые вибрационные исследования ВКУ и ТВС ВВЭР**

На стадии разработки оборудования РУ осуществляют вибрационные эксперименты на фрагментах оборудования, масштабных макетах и полномасштабных стендах. Цель этих исследований — определение частот и типов собственных колебаний конструкций, проверка условий закрепления ВКУ и ТВС, исследование поля скоростей ТН и оценка гидравлических параметров контура, таких, как коэффициенты гидравлических сопротивлений (КГС) различных участков ГЦК, а также обоснование виброресурса. Если масштабирование выполнено точно, то собственные частоты реальной полномасштабной конструкции восстанавливаются из экспериментально найденных собственных частот макета. Для выбора оптимальных конструкторских решений и экспериментального подтверждения виброресурса Генеральный конструктор ВВЭР (ФГУП ОКБ «Гидропресс») создал мощную экспериментальную базу. Ниже перечислены некоторые его стенды, предназначенные помимо решения прочих задач для вибрационных исследований [1–3].

семикассетный стенд высокого давления ВВЭР-1000 для ресурсных испытаний опытных ТВС;

семикассетный стенд низкого давления ВВЭР-1000 для комплексных гидродинамических и вибрационных исследований;

стенд горячей обкатки ВВЭР-1000 и стенд горячей обкатки ВВЭР-440 для ресурсных испытаний опытных ТВС;

стенд динамических испытаний ТВС ВВЭР-1000 для испытаний ТВС динамическими нагружениями на поперечный изгиб, продольное сжатие, ударными и вибрационными нагружениями;

девятнадцатикассетный стенд собираемости АхЗ ВВЭР-1000

ныющий режимы для вибротестирования ТВС возбуждением вибраторами поперечных колебаний.

Выше перечислены так называемые полномасштабные стенды, на которых вибрационным исследованием подвергаются натурные ТВС, твэлы которых заменяют имитаторами, полностью воспроизводящими их массогабаритные характеристики.

Семикасетные стенды позволяют наиболее полно воспроизводить реальные условия антивиброустройств ТВС. На рис. 5.1 показана упрощенная схема такого стенда. В отличие от распространенных однокассетных стендов он моделирует вибрации периферийных и центральных ТВС. С помощью генератора и пьезодавления можно управлять уровнем и спектральным составом пульсаций давления ТН на входе в ТВС. На стенде исследовали поля скоростей ТН по высоте ТВС при неравномерном расходе на входе в АКЗ перемещение ТН в одной ТВС и между ТВС, КГС элементов АКЗ и т.п.

Кроме собственных частот вибрации ТВС необходимо знать частоты вынужденных колебаний, которые обуславливаются АСВ ТН, вибрациями корпуса реактора и ВКУ. Среди последних шихта как наиболее крупное ВКУ, содержащее в себе все другие ВКУ и ТВС, играет определяющую роль. В стендовых условиях нельзя промоделировать все причины формирования ТВС, а также в точности воспроизвести весь спектр вынуждающих вибрации сил, например, таких, как реальный непрерывный спектр турбулентных пульсаций потока ТН или

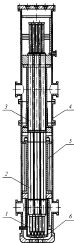


Рис. 5.1 Семикасетеный стенд

1 — опорная труба; 2 — кассета; 3 — задаточная труба; 4 — корпус; 5 — пьезодавление; 6 — опорный цилиндр

дискретный ряд частот АСВ ТН, определяемый геометрией первого контура и температурой ТН, колебания корпуса реактора и шахты АкЗ на собственных частотах.

Строго говоря, для точного воспроизведения всего множества факторов, определяющих вибрации ТВС, недостаточно, чтобы сама ТВС была полномасштабной, необходим еще и полномасштабный контур циркуляции с реальными ГЦН, и полномасштабные ВКУ, т.е. по существу необходим реальный ГЦК.

Вследствие этого всегда ставится под сомнение результаты стендового обоснования виброресурса ТВС.

Например, если на стенде воспроизводили только интегральный уровень пульсаций давления и не моделировали вынужденные вертикальные колебания ТВС, обусловленные вибрациями шахты, а основным механизмом износа оболочек твэлов, допустим, является трение их о дистанционирующие решетки в вертикальном направлении, то такие испытания не представительны.

Успешные попытки воспроизвести вынужденные колебания ВКУ предприняты в МГТУ им. Н.Э. Баумана, где на полномасштабной модели ТВС ВВЭР-440 моделировали вертикальные и маятниковые колебания шахты [4]. Стенд гидродинамических испытаний ТВС ВВЭР-440 МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 5.2) оснащен уникальным детекторным оборудованием: миниатюрными многокомпонентными виброакселерометрами монтируемыми непосредственно в твэлах, центральной трубке и на чехле РК, датчиками пульсаций давления ТН монтируемыми по всей длине РК. Специально разработанные механические вибраторы, имитирующие вертикальные и маятниковые колебания шахты АкЗ вместе с РК, устанавливали на входе измерительной колонки стенда. Частоты и амплитуды возмущений соответствовали реальным частотам и амплитудам, полученным из натуральных нейтронно-шумовых экспериментов на ВВЭР-440. В этих условиях, приближенных к реальным условиям вибронагружения, исследовали новые конструкции РК ВВЭР-440.

На рис. 5.3 показан масштабный (1:5) стенд реактора, на котором довольно точно смасштабированы ВКУ (ФГУП ОКБ «Гидропресс»). На нем отрабатывали элементы конструкции на входе в АкЗ, в результате чего были предотвращены крупномасштабные вихри ТН, снижен уровень пульсаций давления ТН и обес-

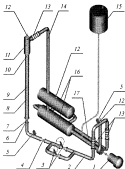


Рис. 5.2. Общая вид стенда

1 — контрольный электроник; 2 — напорный трубопровод; 3 — блок регулирующих клапанов; 4 — измеритель расхода; 5 — манометр; 6 — участок формирования потока на входе; 7 — крепление головки ТВС; 8 — колонка; 9 — тепло-выделяющая сборка; 10 — крепление головки ТВС; 11 — приемное устройство; 12 — воздушник; 13 — гибкий трубопровод; 14 — отводящий трубопровод; 15 — емкость компенсатора объема; 16 — установка байпас; 17 — байпасный трубопровод.

печена равномерная зигура скоростей ТН на входе в АкЗ. Эти очень важные параметры, определяющие вибросостояние ВКУ и ТВС подтверждали еще и на фрагментах моделей входного участка, а затем и на ПНИ.

Генеральный конструктор ВВЭР экспериментировал на моделях шахты с помощью современного метода голографической интерферометрии [5], преимущество которого перед традиционными методами исследования вибраций состоит в том, что типы колебаний визуализируются непосредственно на поверхности макета шахты (рис. 5.4). Были экспериментально получены результаты по большому числу типов колебаний, характеризующихся тем, что определенную собственную частоту вибраций макета одно-

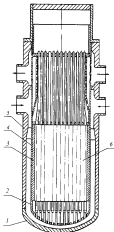


Рис. 53 Модель реактора ВВЭР 1000 (1:5)

1 — дно реактора, 2 — дно шахты, 3 — выгородка, 4 — обечайка шахты, 5 — обечайка корпуса, 6 — шпатор кассеты

ним вертикальным усилием БЗТ. Перечисленные семь горизонтальных плоскостей очевидно, накладывают серьезные ограничения на возможность возникновения низших мод колебаний шахты.

В то же время сам факт их появления и в частности появления маптниковых форм колебаний, рост их амплитуды в эксплу-

значно связывать с фиксированными числами полуволн укладывающихся по высоте и в окружном направлении цилиндра. Однако макет не был точной миниатюрной копией шахты. Представление о вибрациях шахты АкЗ как о совокупности свободных колебаний тонкой цилиндрической оболочки на собственных частотах — весьма грубая модель.

Внешняя цилиндрическая поверхность шахты ВВЭР-1000 в трех горизонтальных плоскостях с различной степенью жесткости соединена с внутренней поверхностью корпуса реактора верхним опорным фланцем, нижним рядом виброгасителей (шпонок) и разделительным кольцом. По внутренней поверхности свободные вибрации шахты АкЗ ограничены в четырех горизонтальных плоскостях двумя рядами шпонок БЗТ, рядом шпонок для выгородки АЗ и нижним опорным кольцом для той же выгородки. Жесткость внутренних шпоночных соединений во многом определяется прижим-

атационных условиях свидетельствует о процессе износа узлов крепления ВКУ или об уменьшении прижимного усилия БЗТ, т.е. является важным диагностическим признаком.

Неабсолютно жесткие, возможно, с зазорами шпоночные ограничители свободных колебаний ВКУ могут послужить причиной перехода колебаний из нижней формы в высшую. Легче всего это показать на примере вынужденных колебаний shaftы АкЗ на частоте корпусной АСВ.

В любой точке внутри корпуса реактора эта акустическая стоячая волна имеет пучность, что в идеализированных предположениях должно привести к нижней форме колебаний (рис. 5.5,а). Однако узлы крепления могут «навязать» свои узловые точки и создать видимость высшей моды колебаний (см. рис. 5.5,б).

На рис. 5.5,б, упрощенно изображена форма shaftы АкЗ в одном из экстремальных состояний вибраций на частоте АСВ. Вместо «бочкообразной» формы она приобрела весьма сложный вид, который ошибочно может быть сынтерпретирован как некоторая высшая мода колебаний.



Рис. 5.4. Модель shaftы с топографическим изображением типа колебаний на собственной поверхности

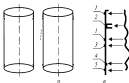


Рис. 5.5. Формы колебаний shaftы (а, б), узлы крепления shaftы, БЗТ и выгородки АкЗ как препятствия для реализации низших типов колебаний shaftы (в);

1 — шпонки БЗТ; 2 — распределительное кольцо; 3 — шпонки выгородки; 4 — шпонки shaftы; 5 — опорное кольцо выгородки

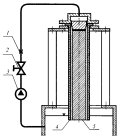


Рис. 5.6. Лабораторный стенд для моделирования вибраций стержня, погруженного в поток теплоносителя:
1 — трубопровод; 2 — задвижка;
3 — насос; 4 — корпусное стекло;
5 — стержень

Несомненная польза проведения экспериментов по исследованию вибраций макетов выявляется, когда их результаты используются для верификации расчетных моделей. При этом не обязательно делать точную копию исследуемого объекта. Иногда достаточно простого макета, чтобы верифицировать сложный расчетный код. Например, влияние движущегося теплоносителя на вибрации ВКУ в различных расчетных моделях учитывают по-разному [6—8], что до сих пор является предметом теоретических исследований. Поэтому прежде чем остановиться на том или ином способе описания воздействия движущегося потока ТН на вибрации ВКУ немецкие исследователи сконструировали простой макет (рис. 5.6)

При различных скоростях ТН и условиях закрепления стержня с его помощью были проведены вибрационные измерения позволившие проверить различные расчетные модели вибрации шахты и сделать выбор в пользу одной единственной [9—11].

При экспериментальном исследовании вибраций ТВС к точным миниатюрным макетам не стремятся, по-видимому, из-за того, что пересчет частот в данном случае практически невозможен. Для отработки отдельных узлов ТВС используют ее соответствующие натурные фрагменты, например, только ДР с тизлом или хвостовик с опорной решеткой или только головку и т.п.

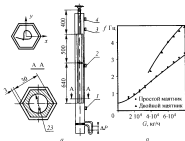


Рис. 5.7. Лабораторный макет АРК (а) и зависимость собственной частоты АРК от расхода топлива (б):

1 — манометр; 2 — датчик перемещений; 3 — акселерометр; 4 — водяной манометр

Как и при моделировании вибрации шахты, простые макеты ГВС применяют для верификации сложных расчетных методов. Так, вибрация АРК как двойного маятника были промоделированы немецкими исследователями на простом лабораторном макете (рис. 5.7) [9—11]. Пропорционально моделировали водяной зазор между топливной частью и чехлом АРК, а также изменяли расход ТН.

Акселерометрами, датчиками перемещений и пульсаций давления фиксировали как собственные частоты колебаний, так и частоты соударений. По экспериментальным зависимостям частоты колебаний АРК (как простого, так и двойного маятника) от расхода ТН были верифицированы расчетные модели (рис. 5.7, б).

В этих же экспериментах было найдено, что при соударениях АРК ее траектория изменяется с образованием так называемой локальной петли (см. рис. 5.7, а). Затем локальные петли в траекториях были найдены по многоканальным записям шумов при аномальных вибрациях шахты и АРК на АЭС Greifswald.

5.2 Расчетное моделирование вибрации ВКУ и ТВС ВВЭГ

Расчетное моделирование вибрации элементов РУ — обширное поле деятельности и бурно развивающееся направление реакторной инженерии. Еще в СССР были созданы мощные группы исследователей вибраций в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова под руководством Н.А. Махутова, в Физико-энергетическом институте им. А.И. Лейпунского под руководством В.С. Федотовских, в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством В.Г. Клиселева, в Горьковском университете под руководством Л.В. Смирнова. Данное направление заслуживает отдельной книги. Здесь же расчетное моделирование представлено результатами одной группы исследователей [12—20] и рассмотрено в иллюстративном плане для демонстрации некоторых возможностей этого направления.

Расчеты вибрации всегда были необходимым этапом конструирования ВКУ и ТВС. Их значимость непрерывно увеличивается с ростом производительности вычислительной техники и развитием вычислительных методов. Нынешний уровень развития расчетного моделирования таков, что оно в состоянии перераспределить акценты в свою пользу в непрерывной цепочке вибрационных исследований «расчет—эксперимент». Модели, например, позволяют вытеснить дорогостоящие эксперименты, если верифицированы достаточным числом дешевых экспериментов. В последнее время локальные и полномасштабные модели вибраций ГЦК ВКУ и ТВС становятся необходимым дополнением СВШК при возникновении нештатных вибросостояний, когда возникают проблемы с интерпретацией новых спектральных образов.

Соответствие «частота резонанса спектральной характеристики некоторого сигнала СВШД — собственная частота некоторого элемента конструкции РУ», строго говоря, некорректно. На частоте любого резонанса происходит вибрация конструкции РУ в целом, так как конструкция РУ представляет собой систему связанных масс.

Уравнения колебания конструкции содержат матричные операторы инерции, демпфирования и упругости, конкретный вид которых может давать локализованные в пространстве решения

(виброперемещения конструкции). Другими словами, на некоторой резонансной частоте виброперемещения могут столь быстро расти при удалении от некоторого элемента конструкции, что именно с ним можно связать данную резонансную частоту вибраций. Однако следует различать частоты собственных колебаний какого-либо элемента вне связи с другими элементами конструкции и частоты вибраций данного элемента, когда он находится в составе ГЦК. Если вычленишь из системы связанных масс некоторый элемент и найти (расчетно или стендовым моделированием) его собственные частоты, то в связанной системе их может и не быть.

Для моделирования конструкции чаще всего используют конечный элементный метод как наиболее универсальный для дискретизации сложных пространственных систем. Прямое конечно-элементное вибромоделирование таких сложных конструкций, как ГЦК или ТВС, нецелесообразно. Например, для ТВС ВВЭР-1000 прямое моделирование только направляющих каналов (НК), твэлов и связей между ними потребует ввести более 11 000 узлов. Подобная модель будет чрезмерно громоздка для задач диагностики. Более того, прямое моделирование такой регулярной конструкции приведет к большому количеству кратных и неинформативных тонов, что усложняет как расчет собственных характеристик, так и интерпретацию результатов. Поэтому редукция полномасштабной модели является важным этапом решения задачи. Редукцию осуществляют созданием упрощенных локальных моделей отдельных подсистем и их последующим объединением. Такой подход был реализован при создании вибрационных моделей ГЦК ВКУ и ТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 [11–14].

5.2.1 Моделирование вибрации ТВС ВВЭР 1000

ТВС ВВЭР 1000 представляет собой систему параллельных стержней, расположенных близко один к другому и погруженных в жидкость. Как известно, при колебаниях пучков стержней в жидкости возникает взаимодействие между конструкцией и жидкостью, приводящее к снижению собственной частоты конструкции и увеличению демпфирования. В данном случае влияние жидкости невелико (не превышает 15%)



Рис. 5.8. Первые три типа собственных колебаний ТВС

На первом этапе разрабатывается локальная модель ТВС, включающая 19 направляющих каналов, 312 тизлов 15 дистанционирующих решеток, головку и хвостовик. ДР закреплены на центральной трубе и допускают свободное перемещение в своих ячейках направляющих каналов и тизлов в осевом направлении. Тизлы не являются силовым элементом конструкции, так как они не связаны с головкой и не воспринимают осевую нагрузку.

Они взаимодействуют с опорной конструкцией ТВС через ДР и опорную решетку. На рис. 5.8 показаны результаты моделирования в виде трех нижних типов колебаний ТВС ВВЭР 1000, каждому из которых соответствует своя собственная частота (тон).

Модель позволяет рассматривать изменение собственных характеристик ТВС, обусловленных следующими аномалиями:

- изменением условий закрепления ТВС (асплатные освобожденные головки, износ опорных стаканов);
- изменением условий обжатия тизлов и направляющих каналов в ДР;
- повреждением ДР;
- релаксацией пружинного блока ТВС;
- повреждением направляющих каналов.

Таблица 5.1. Собственные частоты колебаний, Гц, ТВС ВВЭР 1000 для различных вариантов обжатия тизлов в ДР

Номер тона	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1	1,14	1,59	1,73	2,40
2	3,24	3,99	10,28	6,80
3	6,46	7,40	20,13	13,56

Примечание. Вариант 1. Все тизлы зафиксированы во всех ДР только в боковом направлении (x , y) и свободны в осевом (z). Вариант 2. Все тизлы зафиксированы во всех ДР во всех трех направлениях (x , y , z). Вариант 3. Все тизлы свободны во всех ДР. Вариант 4. Те же самые условия, что и для варианта 1, только тизлы не взаимодействуют с оболочкой тизла.

Таблица 5.2. Собственные частоты колебаний, Гц, ТВС при различных закрепления головки и хвостовика (шкалы свободы в ДР)

Номер моды	Заделка головки и хвостовика	Свободное опирание головки и хвостовика
1	3,73	3,52
2	10,28	4,57
3	20,13	16,43

Моделирование изменения условия обжатия твэлов и направляющих каналов в ДР проводят варьированием коэффициентов матрицы жесткости. Условия закрепления ТВС моделируют полной или частичной фиксацией узлов головки и хвостовика соответствующих месту опоры.

В табл. 5.1 приведены собственные частоты ТВС для разной степени обжатия твэлов в ДР, а в табл. 5.2 — для разных условий закрепления головки и хвостовика.

Как следует из табл. 5.2, условия заделки концов ТВС практически не влияют на первую собственную частоту, но существенно влияют на частоты всех других высших мод.

5.2.2 Моделирование ВКУ ВВЭР 1000

Особенностью следующего этапа моделирования является учет взаимодействия элементов конструкций (корпуса, шахты, выгородки) с жидким теплоносителем. Для этого необходимо разрабатывать модель с применением оболочечных конечных элементов для корпуса реактора, шахты и выгородки, объемных конечных элементов для жидкости и взаимодействия жидкости и конструкции на их границе. В такой модели используют упрощенные модели Ак3 и БЗТ что позволяет моделировать следующие anomalies: износ узлов крепления шахты; релаксацию упругих трубчатых элементов; повреждения в креплении выгородки к днищу шахты; неполное обжатие шахты по разделителю потока; изменение зазоров между шахтой и корпусом а также между шахтой и выгородкой.

Примеры расчетов собственных частот и форм колебаний приведены на рис. 5.9 и в табл. 5.3

Таблица 5.3. Собственные частоты колебаний

Элемент конструкции	Число полуволн	Частота Гц
Шакта (нижний шпоночный узел с зазором)	1	9,7
Шакта (нижний шпоночный узел без зазора)	1	13,5
Вытормозка	1	8,5
	2	9,7
Шакта	2	9,8
	3	13,6
	4	22,2

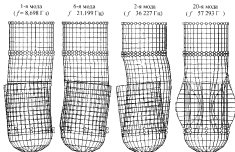


Рис. 5.9 Типы колебаний шакты и вытормозки активной зоны ВВЭР-1000

5.2.3 Сравнение расчетных и экспериментальных данных по вибрации шакты ВВЭР-1000

В натурных виброшумовых экспериментах на ВВЭР-1000 [21—25], а также экспериментах на ПНИ головных блоков ВВЭР-1000 совместные колебания корпуса реактора и шакты на собственных частотах в виде отдельно стоящих резонансов спектральных характеристик чаще всего не обнаруживаются. Типичные виброшум

мые характеристики сигналов ДАП и ИК представлены на рис. 5.10. Однако следует ожидать появления низкочастотных резонансов (менее 8 Гц) при износах шпоночных соединений, не полном обжатии разделителем потока шахты и частичной потере жесткости трубчатыми элементами. Все пики функции когерентности сигналов ДАП ИК (см. рис. 5.10), за исключением пика на оборотной частоте ГЦН (16,6 Гц), обусловлены АСВ. Это вынужденные колебания корпуса реактора и шахты на различных акустических частотах.

Из расчета следует, что низшая собственная частота колебаний шахты АзЗ равна 9,7 Гц, что очень близко к частоте корпусной АСВ, а другие типы колебаний (см. рис. 5.10) происходят на частотах выше 24 Гц.

Возможно, именно одновременным воздействием акустики контура и вибраций шахты объясняется мощный эффект, который всегда наблюдается на частоте 8,7 Гц в сигналах ИК и ДАП. Таким образом на частоте 8,7 Гц внезонный нейтронный шум модулируется двумя источниками Во-первых описанный выше

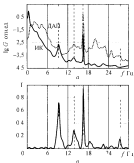


Рис. 5.10 АСПМ сигналов ДАП и ИК (а) и их функции когерентности (б)
Блок II БэлАЗС (ИВЭР-1000)

эффект модуляции нейтронов утечки толщиной водяного зазора «шахта—корпус» вследствие вибрации шахты, во-вторых, реактивный (а значит глобальный, не зависящий от пространственных координат) барометрический эффект, возникающий в результате изменения акустическими стоячими волнами плотности той носителя при периодическом изменении давления.

С помощью MAP-анализа следует определить, в каких пропорциях присутствуют описанные выше эффекты на частоте 8,7 Гц. Такая MAP-модель должна строиться на сигналах ИК и ДПД. За тем по вибрационному компоненту (вкладу сигнала ИК в сигнал ДПД) можно оценить вибрация шахты, а по барометрическому компоненту (вкладу сигнала ДПД в ИК) — барометрический коэффициент реактивности

5.2.4 Моделирование вибрации ТВС ВВЭР 440

В отличие от ТВС ВВЭР 1000 на вибросостоянии РК ВВЭР 440 оказывает влияние чехол РК (табл. 5.4.).

Как следует из табл. 5.4. совместные колебания чехла с твэлами наблюдаются, начиная с 12,0 Гц, а во всех низших типах колебаний принимает участие только пучок твэлов. Собственные ча-

Таблица 5.4. Зависимость собственных частот, Гц, пучка твэлов и чехла от степени обжатия твэлов в ДР

Элемент конструкции, форма колебаний и число полуволн n	Вариант 1	Вариант 2
Пучок (изгибные, $n=1$)	3,4	2,9
Пучок (изгибные, $n=2$)	8,2	6,2
Пучок (прямые, $n=1$)	12,5	11,9
Пучок (изгибные, $n=3$)	14,6	12,1
Пучок (изгибные, $n=4$)	22,4	20,1
Пучок (изгибные, $n=5$) + чехол (изгибные, $n=1$)	26,3	24,8
Пучок (изгибные, $n=5$) + чехол (изгибные, $n=2$)	38,9	36,9
Пучок (изгибные, $n=6$)	42,1	40,3

Примечание. Граничные условия для ТВС: кистовые — шарнир (шар по корпусу), головка — прижатый блок без боковых люфтов. Вариант 1. Твэлы зажаты во всех ДР по трем направлениям (шарнир), а в нижней решетке — заделка. Вариант 2. Твэлы зажаты в ДР только в боковом направлении и свободны в осевом, а в нижней решетке — заделка.

Таблица 5.5 Собственные частоты, Гц, твэлов при жесткости ячеики $c_{\text{яч}} = c_{\text{яч}} = 1,5 c_0$, $c_{\text{яч}} = 0$ (c_0 — жесткость одной пластины)

Номер твэла	$c_0 = 1,2 \cdot 10^5$ Н/м в нижней решетке — шарнир	$c_0 = 1,2 \cdot 10^5$ Н/м в нижней решетке — заделка	$c_0 = 2,4 \cdot 10^5$ Н/м в нижней решетке — шарнир
1	136,5	148,0	190,0
2	167,6	171,0	227,0
3	182,0	184,0	230,0

Таблица 5.6 Зависимость собственных частот, Гц, пучка твэлов и чехла от степени обжатия твэлов в ДР при аномальном закреплении РК в головке и хвостовике

Элемент конструкции, форма колебаний и число полуволн n	Вариант 1	Вариант 2
Пучок (колебные, $n = 1$) + чехол как консоль	2,8	1,9
Чехол как консоль + пучок ($n = 1$)	3,6	4,6
Пучок (колебные, $n = 2$) + чехол как консоль	10,0	7,8
Пучок (вращение, $n = 1$) + чехол как консоль	12,5	12,5
Пучок (колебные, $n = 3$) + чехол как консоль	16,9	14,1
Пучок (колебные, $n = 4$) + чехол как консоль	25,8	22,6
Пучок (колебные, $n = 5$) + чехол как консоль	36,3	32,3
Пучок (колебные, $n = 6$) + чехол как консоль	47,7	45,0

Примечание. Граничные условия для ТВС: хвостовик — заделка (перекос длинного хвостовика), головка — пружинный блок с боковыми люфтами. Вариант 1. Твэлы жестко во всех ДР по трем направлениям (шарнир), в нижней решетке — заделка. Вариант 2. Твэлы жестко в ДР только в боковом направлении и свободны в осевом, в нижней решетке — заделка.

стоты колебаний твэлов лежат в области свыше 100 Гц при любом взаимодействии с ДР (табл. 5.5).

В табл. 5.6 представлены результаты моделирования аномального закрепления самой РК в головке и в хвостовике. Здесь чехол участвует в совместных колебаниях с твэлами, начиная уже с самых низших типов колебаний.

5.2.5 Моделирование вибрации шасси ВВЭР 440

Разработка вибрационных моделей для реакторной установки ВВЭР-440 с использованием кода ANSYS была начата в Институте ядерных исследований (FZR, г. Россендорф) и продолжена в России на предприятии Динапром. Цель моделирования не

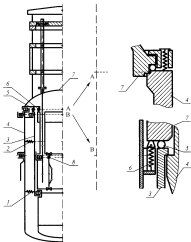


Рис. 3.12. Схематизация взаимосвязей конструктивных элементов корпуса реактора, верхнего блока, ВКУ и ТВС для составления вибрационной модели (В-213) [26];

1 — виброгаситель; 2 — лабиринтное уплотнение; 3 — шпата; 4 — корпус; 5 — трубчатый элемент; 6 — пружинный блок БЭТ; 7 — крышка; 8 — пружинный блок ТВС

мешких исследователей — интерпретация результатов вибромониторинга и получение вибрационных образов повреждений на АЭС Greifswald и Dukovany в России исследования проводили для НВАЭС и КоАЭС

Ключевой момент моделирования — конечно-элементное представление объекта или его так называемая дискретизация. Наглядное представление о решении задачи дискретизации объекта ко

нечно-элементного моделирования дает рис. 5.11, где показано взаимодействие только трех наиболее крупногабаритных элементов конструкции РУ В-230 (корпуса, шахты и верхнего блока).

На рис. 5.12 для сравнения представлен подход к решению задачи дискретизации объекта (проект В-213) чешскими исследователями, которые довольно подробно формализовали взаимосвязи элементов конструкции корпуса реактора, ВКУ, ТВС и верхнего блока, но пока не предъявляли результаты верификации модели по нейтронно-шумовым и вибрационным каналам измерений.

Небольшое различие спектральных виброхарактеристик различных блоков с ВВЭР-440 объясняются малыми конструктивными различиями конкретных проектов, особенностями монтажа и неодинаковым техническим состоянием конструкций. Поэтому вибрационную модель необходимо настраивать индивидуально для каждого блока. Адаптация модели ВВЭР-440 к конкретному блоку позволяет определить вероятные причины отличий его вибросостояния от вибросостояния других блоков.

Покажем это на примере блока I Кольской АЭС, на котором в отличие от АЭС Greifswald, Dukovany, Paks, наблюдается дублирование резонансов с частотами 4,9 и 5,8 Гц в спектрах сигналов ДАП и ИК. Наличие резонансов в этих двух типах детекторов свидетельствует о том, что происходит совместные колебания шахты и корпуса реактора. Модель с базовыми параметрами не позволяет получить эти резонансы, расчеты с ее использованием дают следующие результаты: 3,4 Гц — совместные колебания пеллет и корпуса; 4,6—4,7 Гц — колебания верхнего блока и корпуса; 10,3—10,5 Гц — маятниковые колебания корпуса реактора; 14,2 Гц — колебания шахты реактора.

Для блока I КоАЭС в спектрах ДАП и ИК резонанс в районе 14 Гц, соответствующий колебаниям шахты с двумя закрепленными концами, отсутствует. Поэтому можно предположить, что для данного блока нет фиксации шахты в нижнем шпоночном узле, и мощные резонансы на частотах 4,9 и 5,8 Гц, которые присутствуют в спектрах ИК и ДАП, соответствуют совместным маятниковым колебаниям шахты и корпуса с одним закрепленным концом. наилучшее совпадение между расчетом и экспериментом (рис. 5.13) достигнуто при уменьшении суммарной жесткости

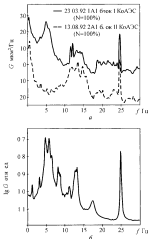


Рис. 5.13. Экспериментальные АСПМ сигналы ДАП блоков I и II КАЗС (а) и АСПМ, полученная из адаптированной под блок I КАЗС виброакустической модели (б)

шпонок до 9% и уменьшении жесткости опорного бурта корпуса реактора до 20% базовых параметров. При этих параметрах получены следующие значения частот. 4,72 и 4,84 Гц — маятниковые колебания корпуса реактора и шахты в фазе, 5,73 и 5,83 Гц — маятниковые колебания шахты и корпуса в противофазе. Две частоты для каждой формы объясняются разной податливостью системы в двух взаимно перпендикулярных направлениях вследствие несимметричного расположения петель.

Список литературы

1. Леонов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002.
2. Исследование гидравлических характеристик реактора, насосов, оборудования первого контура на моделях в АЭС. / Ю.А. Безруков, С.А. Логинцов, В.Н. Ульяновский, Л.А. Салий // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Сборник трудов 2-й Всероссийской научно-технической конференции. 19–23 ноября 2001, Подольск.
3. Махутов Н.А., Фролов К.В., Стекольников В.В. Экспериментальные исследования деформаций и напряжений в ВВЭР. М.: Наука, 1990.
4. Саломин В.Н., Переложников В.В., Рашин Н.Ф. Расчетно-экспериментальные исследования вибрационного поведения ТВС водоохлаждаемых реакторов в условиях комбинированного гидромеханического нагружения // Доклады Питой Международной конференции по проблемам колебаний. ICOVP-2001 М. Институт машиноведения РАН 2001 С. 433–437.
5. Вибропрочность оборудования АЭС / Н.А. Махутов, А.А. Гусаров, А.И. Усанов и др. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1988 Т. 22. С. 68–80.
6. Динамика конструкций гидрозолупных систем / Фролов К.В. Махутов Н.А., Каплунов С.М. и др. М.: Наука, 2002.
7. Федотовский В.С., Верещагина Т.Н. О колебаниях системы цилиндрических оболочек с жидкостью и пучком стержней // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Сборник трудов 3-й Всероссийской научно-технической конференции. 26–30 мая 2003, Подольск.
8. Федотовский В.С. Виброакустическая динамика гетерогенных и стержневых систем. Теплофизические исследования // Сборник статей, посвященный 30-летию акад. В.И.Субботина. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ 1999. С. 66–79.
9. Grunwald G. et al. Experimental investigation of flow-induced control element movements by noise analysis. // Proc. of symposium for nuclear power plant control and instrumentation. 1978. Vol. 1. P. 291.
10. Schumann P., Weiss F.-P. The influence of control element movement due to abnormal core barrel motion on ex-core neutron noise at WWR-440 type reactors // IAEA-NPPCI specialist's meeting, 20–22 June 1989 Dresden DDR. P. 227.
11. Analytical model for the description of control element vibration occurring during abnormal core barrel motion at WWR-440 type reactors and for the interpretation of phase relations between in-core and ex-core neutron noise / E. Altstadt, G. Grunwald, P. Liewers et al. // Proc. of Third International congress on condition monitoring and diagnostic engineering management. 3–4 July 1991. Jolly, Southampton Institute, UK.

12. Kinelev V., Perov S., Salimov V. The mathematical modeling of free vibrations of VVER-1000 plant primary circuit for the equipment condition diagnostics // A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics. SMORN-VII. 19-23 June, 1995, Avignon, France. Session 9 — Vibrations structures: modeling and monitoring. Vol. 2. P. 9.9.

13. Математическое моделирование динамических процессов в гидромеханических системах / В.Г. Кинелев, В.И. Дронг, С.В. Лебедев, С.Л. Перов // Тез. докл. научной конф., посвященной 165-летию МГТУ. Ноябрь, 1995 Москва

14. Altstadt E., Grunsald G., Weiss F.-P. Theoretical vibration model of VVER reactors considering fluid — structure interaction // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VII. 19-23 June, 1995, Avignon, France. Session 9 — Vibrations structures: modeling and monitoring. Vol. 2. P. 9.7

15. Kinelev V., Perov S., Salimov V. Theoretical modeling of fuel assembly vibrations for VVER-type reactors // Specialists' meeting on in-core instrumentation and reactor core assessment. INCORE-96. 14-23 October, 1996 Mito, Japan. P. 6.4.1—6.4.9.

16. Кинелев В.Г., Перов С.Л. Вибрационные модели для диагностики оборудования первого контура реакторов ВВЭР // Неразрушающий контроль и диагностика. Тезисы докладов 15 Международной конференции 1999, Москва.

17. Перов С.Л. Трехмерная модель акустических колебаний теплоносителя реактора ВВЭР-1000 // Неразрушающий контроль и диагностика Сборник докладов 15 Международной конференции. 1999 Москва

18. Перов С.Л. Колебательно-элементное моделирование динамики конструкций в жидкостях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 1999 (3). № 2. С. 48—58

19. Perov S., Altstadt E., Weiss F.-P. Analysis of fluid-structure interaction at WVER-1000 type reactors // Proc. ICONE-8, 2—6 April, 2000, Baltimore, USA. ICONE 8446

20. Perov S., E. Altstadt, Werner M. Vibration analysis of the pressure vessel internals of WVER-1000 type reactors with consideration of fluid-structure interaction // Ann. Nucl. Energy. 2000. Vol. 27. P. 1441—1457.

21. Булавин В.В., Гусев Д.Ф., Павелко В.И. Исследования характеристик вибродиагностики ВВЭР-1000 в эксплуатационных условиях // Атомная энергия. 1995. Т. 79. Вып. 5. С. 343—349.

22. Интерпретация нейтронно-шумовых экспериментов на реакторе ВВЭР-1000 / И.Е. Лазаревская, С.А. Морозов, Л.А. Соболев, Д.М. Швецов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 1996. № 2. С. 40.

23. Gusev D., Pavelko V. Neutron-temperature noise methods and their experimental check on the reactor VVER-1000 // Specialists' meeting on

in-core instrumentation and reactor core assessment INCORE 96 14–23 October, 1996. Mito, Japan. P. 6.8.1–6.8.7.

24. Гусев Д.Ф., Павелко В.И. Шумовые методы диагностики ВВЭР // Атомная энергия. 1997. Т. 82. Вып. 4. С. 264–271.

25. Анисим Г.Г., Гусев Д.Ф., Павелко В.И. Физическая интерпретация нейтронно-шумовых образов ВВЭР // Атомная энергия. 1997. Т. 82. Вып. 4. С. 271–277.

26. Peciaka L., Dupai J., Zeman V. Lesson Learnt from Mathematical Modeling of Primary Circuit of VVER-440/213 (SMORN-VIII) // Prog. Nucl. Energy 2003 Vol 43 N1–4 P 167–175

Специфические режимы функционирования СВЩД

6.1 Информация для СВЩД, которую необходимо получить при вибронизмерениях на пусках блоков ВВЭР

Все пусконаладочные испытания (ПНИ) отечественных блоков АЭС проводились без СВЩД. Внедренные на российских АЭС СВЩД — система CARD на блоке I КинАЭС и четыре системы SÜS на блоках ВВЭР-440 — монтировались на блоках, уже находящихся длительное время в эксплуатации. Это одна из причин не столь успешного функционирования перечисленных систем. Фирма Siemens, внедряющая свои локальные системы диагностики чаще всего на блоки, уже находящиеся в эксплуатации, разработала некоторые компенсирующие измерения (см. разд. 6.3), в результате проведения которых отчасти восполняется априорная неопределенность по виброшумовой информации.

В то же время Генеральным конструктором ВВЭР разработаны обширные программы вибронизмерений в составе ПНИ [1], направленные на подтверждение принятых проектных решений по условиям вибропрочности. Они в обязательном порядке выполняются при пусках новых блоков АЭС, а при пусках головных новых блоков выполняется расширенная программа вибронизмерений. Одна из главных задач ПНИ — определение виброн нагруженности ВКУ и ТВС и сравнение соответствующих характеристик, полученных по уже проведенным другим ПНИ. Для приемки результатов ПНИ применяют контрольные (нормативные) значения параметров, разработанные по статистической обработке результатов испытаний трех головных реакторов ВВЭР-1000. Непосредственно измеряют возмущающие воздействия в виде пульсаций давления ТН и вибраций ГЦН и динамический отклик ВКУ и ТВС. Для этого ГЦК ВКУ и ТВС оснащаются большим числом временных датчиков (рис. 6.1) число которых может достигать нескольких сот

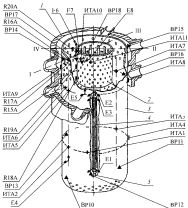


Рис. 6.1. Оснащение временными датчиками ВКУ и ТВС на ПНИ [1].
 1 – корпус реактора; 2 – обечайка БТТ; 3 – шасси внутрискорпусная; 4 – центральный вымпел толкающей кассеты; 5 – опорная труба ▲ датчик пульсации давления; ◆ – тензорезисторы; ⌋ вибродатчик

Таким образом реализуется ныне действующая концепция обеспечения вибропрочности в соответствии с которой:

параметры вибросостояния различных элементов РУ и вынуждающие вибрации факторы при пуске блока не уклоняются от соответствующих параметров, полученных на ПНИ головного блока
 возможный неспроектированный вибронанос отдельных элементов РУ устраняется при проведении ППР

контроль вибросостояния ВКУ ТВС корпус реактора и основного оборудования ЦК в процессе нормальной эксплуатации не проводится.

Виброресурс закладывается проектными решениями, его стартовое состояние контролируется на ПНИ методом сравнения с ПНИ головного блока, обеспечивается соблюдением проектных режимов работы РУ и проведением ППР. Об исчерпании виброресурса в текущий момент эксплуатации блока по этой концепции можно судить лишь по расчетам – причем истинные вибронагрузки различных элементов РУ за всю историю эксплуатации неизвестны, или о них можно судить после материаловедческих исследований и различных геометрических измерений.

Конечно – как и при обеспечении ресурса по другим типам нагружения РУ – виброресурс обеспечивается весьма консервативными расчетами, т.е. закладывается с большим запасом. Тем не менее, мировой опыт эксплуатации АЭС показал, что существуют и «слабые» места в конструкциях РУ, и непроектные (иногда неконтролируемые) нагружения – которые приводят к инцидентам на АЭС.

Эту информационную неопределенность, когда деградация виброустойчивости между двумя ППР и медленная деградация виброустойчивости отдельных труднодоступных узлов РУ в течение всего срока ее эксплуатации не контролируются, и должна восполнить СВШД. Очевидно, что в СВШД должны быть заложены стартовые виброхарактеристики. Для этого СВШД, устанавливаемая на новый блок АЭС, должна быть изготовлена и смонтирована к моменту начала ПНИ и большинством своих измерительных каналов включена в состав технических средств вибромониторинга на ПНИ. Далее необходимо последовательно совершать синхронные записи реализаций сигналов датчиков СПНИ и датчиков СВШД, преследуя следующие цели:

- локализовать собственные частоты и типы колебания ВКУ и ТВС

- прокалибровать в абсолютных единицах (виброперемещений или виброускорения) спектральные особенности сигналов ДАП

- выработать стартовые диагностические пороги для каналов измерения ДОП, ДАП, ДПД по множеству проведенных режимов на ПНИ

- зарегистрировать температурные зависимости параметров спектральных особенностей сигналов ДПД, ДОП, ДАП

6.2 Пример локализации собственных колебания ТВС по результатам вибронизмерений в ПНИ

Используемый в ПНИ имитатор ТВС в точности совпадает с натурной ТВС по массогабаритным характеристикам, следовательно, будут совпадать и собственные частоты имитатора ТВС с собственными частотами натурной ТВС. Аналогичный вывод очевиден и для пространственных форм колебаний на собственных частотах. В стандартной конфигурации на имитаторе ТВС располагаются два двухкоординатных датчика $E1$ – $E3$ с компонентами (рис. 6.2):

$E1(1)$ – $E1(2)$ — компоненты тензоакселерометра $E1$, установленного на хвостовике ТВС, чувствительные к вибрациям в горизонтальных взаимно перпендикулярных направлениях

$E3(r)$, $E3(z)$ — компоненты тензоакселерометра $E3$, установленного на головке ТВС, чувствительные к вибрациям в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Кроме перечисленных акселерометров, в ПНИ по временной схеме монтируется множество других датчиков в частности тензо- и вибродатчики на шахте.

В ПНИ блока УАЭС Козлодун была произведена многоканальная запись сигналов акселерометров на имитаторе ТВС ($E1$, $E3$) и шахте ($E5$). Акселерометр $E5$ установлен в горизонте «холодного» трубопровода и имеет компоненты $E5(r)$ и $E5(z)$, чувствительные к вибрациям шахты в горизонтальном и вертикальном направлениях, соответственно

Следует ожидать, что в перечисленных шести сигналах акселерометров содержатся характерные частоты вибрации ВКУ, ТВС и вынуждающих вибрации сил (АСВ–ПЦН).

На рис. 6.2 оценки АСПМ и функций когерентности между сигналами перечисленных акселерометров соответствуют расположению датчиков на ТВС и шахте. Все авто- и взаимные спектральные характеристики (см. рис. 6.2) обладают глобальным максимумом на частоте 2,5 Гц.

Иными словами на этой частоте хвостовик, головка ТВС и шахта находятся в совместном колебательном движении. Его можно характеризовать как сложное движение, поскольку все компоненты (и горизонтальные и вертикальные) всех датчиков чувст-

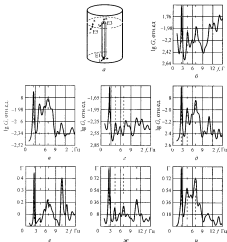


Рис. 6.2. АСПМ и функции когерентности сигналов двухкоординатных акселерометров, установленных на взрывнике, ползунке ТВС и шланге реактора.

а – схема расположения акселерометров; б – АСПМ $E3(r)$; в – АСПМ $E5(r)$; г – АСПМ $E1(l)$; д – АСПМ $E1(l)$; е – когерентность $E3(r)$ – $E5(r)$; ж – когерентность $E1(l)$ – $E5(r)$; з – когерентность $E1(l)$ – $E3(r)$

вительны к нему. Таким образом, каждая из измеряемых точек описывает в пространстве сложную траекторию, которую нельзя представить в виде простой геометрической фигуры (круга эллипса или, тем более, отрезка прямой).

Вследствие высокой когерентности любых комбинации сигналов на частоте 2,5 Гц, все измеряемые точки находятся в согла

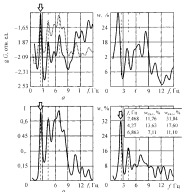


Рис. 4.3. АСПМ, функции когерентности и взаимные вкладки, полученные МАР анализом для перекрестной составляющей сигналов акселерометров, установленных на ТВС и шахте реактора при проведении ПНН (блок V АЭС Кошкудуй):

а – АСПМ (сплошная линия – $E_3(t)$, пунктирная – $E_5(t)$); б – когерентность сигналов $E_3(t)$ и $E_5(t)$; в – вклад сигнала $E_3(t)$ в сигнал $E_3(t)$; г – вклад сигнала $E_5(t)$ в сигнал $E_3(t)$ (в таблице приведены характерные частоты и соответствующие им вкладки сигналов)

совином коллективном движении, у которого практически отсутствует случайный компонент. Этот фактор, а также высокая добротность пика на частоте 2,5 Гц свидетельствуют о том, что данная спектральная особенность вызвана собственными колебаниями системы «шахта-ТВС» – частота 2,5 Гц является ее собственной частотой.

Пик на частоте приблизительно 4,2 Гц, наблюдаемый на всех спектральных характеристиках, составляет 1/4 субгармоники оборотной частоты ГЦН. Наличие таких субгармоник сопровождают ударные взаимодействия между элементами конструкций, напри

мер, ударные взаимодействия между корпусом и шахтой в шпоничных соединениях и/или удары между дистанционирующими решетками ТВС. Остальные значимые частоты (см. рис. 6.2) соответствуют вынужденным вибрациям на частотах АСВ (6,9 и 9,8 Гц).

На рис. 6.3 приведены результаты МАР анализа сигналов E3(r) и E5(r), направленного на выявление первоисточника пика на частоте 2,5 Гц. Формы АСПМ сигналов E3 и E5 очень близки друг к другу, и когерентности доминирующих пиков достаточно велики (достигают 0,7), что свидетельствует о сильной связанности исследуемых процессов. Тем не менее, по вкладу сигнала E5 (шахта) в сигнал E3 (головка ТВС), равному 12%, и значению обратного вклада E3 в E5, равному 31%, можно заключить, что именно ТВС, а не шахта, является первоисточником колебаний на частоте 2,5 Гц. Данный эксперимент является прямым натурным свидетельством наличия собственной частоты колебаний ТВС равной 2,5 Гц.

В современных схемах ПНИ разработанных Генеральным конструктором ВВЭР, по сравнению с традиционными схемами значительно увеличен объем вибронизмерений. На рис. 6.4 показаны датчики, смонтированные в имитаторе ТВС при проведении ПНИ на энергоблоке 1 Волгодонской АЭС (2000 г.)

6.3 Базовые измерения

При вводе в опытную эксплуатацию какой-либо локальной системы диагностики ее необходимо оснастить некоторым минимумом экспериментальной информации, недоступной при проектировании системы. Такой этап внедрения системы диагностики обычно называют базовыми измерениями. Для их проведения в локальной системе диагностирования предусматриваются настроечные параметры, конкретные численные значения которых становятся известны только после «привязки» системы к объекту диагностирования. Предусматриваются также БД, содержащее которых — большие объемы массивов экспериментальных данных также начинает появляться только с этого момента.

Большая доля базовых измерений совершается для обеспечения качества собственных сигналов системы. Проверяется рабо-

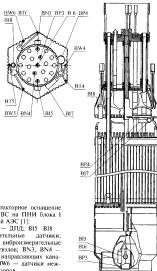


Рис. 6.4. Детекторное оснащение имитатора ТВС на ПНИ блока I Волгодонской АЭС [1].

BP3, BP4 — ДДЦ; B15, B18 — виброизмерительные датчики; BT4—BT6 — виброизмерительные имитаторы толчков; BN3, BN4 — вибронды направляющих каналов; BW4—BW6 — датчики меж-касательных зазоров.

тоспособность измерительных трактов производится их настройка, калибровка, подбираются коэффициенты усиления, и т.д. Здесь мы не будем касаться этих очень важных вопросов адаптации технических средств к объекту диагностирования, а уделим внимание получению экспериментальной диагностической информации об объекте, которую в известном смысле можно было бы назвать атректорной

Объем базовых измерений зависит не только от типа локальной системы диагностики, но и от того, на какой блок АЭС монтируется данная система диагностики. При вводе СВЩД на новый блок, как уже показывалось выше, экспериментальную диагностическую информацию следует начинать получать уже при подготовке к ПНИ. При вводе системы на уже функционирующий блок АЭС для этих целей используются периоды времени, в которые блок находится на ППР, а также разогрев блока и выход его на мощность.

Для СВЩД разработана следующая последовательность экспериментов. В начале исследуются спектры сигналов всех датчиков при разогреве реактора (рис. 6.5, 6.6). В результате выявляются температурные и барометрические зависимости местоположения резонансов на оси частот. Например, резонансы, обусловленные АСВ, с увеличением температуры ТН перемещаются по оси частот влево.

Изменению значения собственных частот вибрации различных элементов конструкции с увеличением температуры ТН происходит, как правило, немонотонно. Наконец, есть резонансы, частоты которых неизменны при изменении температуры ТН и давления в ЦК. Как правило, эти резонансы связаны с оборотной частотой ЦН (гармоники, субгармоники).

Такие семейства кривых (см. рис. 6.5), называемые «водопадом спектров», и являются основным инструментом первичной классификации резонансов.

Существенно, что скорости изменения частоты резонанса с температурой различны для разных типов АСВ. Водопады спектров по сигналам датчиков перемещений и вибраций, а также соответствующие семейства функций когерентности между сигналами нерасчисленных датчиков и сигналами ДПД сразу классифицируют их на резонансы собственных и вынужденных колебаний.

По каждому монотонному изменению частоты резонанса при изменении того или иного фактора строится эмпирическая зависимость, которая далее будет употребляться как некая опорная стартовая зависимость. Так, для серийного ВВЭР-1000 (проект В-320) частоты АСВ_{ДП} и АСВ_{БК} в диапазоне температур 240–320 °С удовлетворительно описываются следующими линейными зависимостями (частота, Гц; температура, °С):

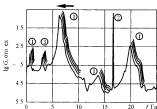


Рис. 6.5. Классификация пиков АСПМ сигнала ДПН при изменении температуры ТН (стрелкой показано направление смещения резонансов, обусловленных АСВ с увеличением температуры ТН):

1 — резонансом АСВ; 2 — резонанс с неизменной частотой (в данном случае резонанс на оборотной частоте ГЦН); 3 — резонансом, обусловленным БВД

$$f_{АСВ_1} = -0,0175T + 12,20$$

$$f_{АСВ_2} = -0,0215T + 16,60.$$

Заметим, что различие скоростей изменения частот этих двух АСВ превышает 20%.

С точки зрения диагностики РУ знания частот и амплитуд АСВ необходимы для мониторинга возбуждающих вибраций сил. Из линейной экстраполяции последней зависимости в ноль следует что при низких температурах ТН в начале разогрева реактора $f_{АСВ_1}$ близка к оборотной частоте ГЦН. Совпадение частот двух самых мощных внешних вынуждающих сил может привести к увеличению уровня вибраций ВКУ и ТВС при низких температурах ТН. Для других АСВ также существуют такие температуры ТН, не превышающие 320 °С, при которых происходит совпадение их частоты с оборотной частотой ГЦН или с частотой какой-нибудь ее гармоники. Такие совпадения неизбежны в процессе разогрева реактора — однако важно, чтобы эти резонансные явления не приводили к аномальным вибрациям при номинальных параметрах реактора или каких либо других стационарных рабочих режимах функционирования РУ.

Частоты АСВ — наиболее консервативные параметры. Они оп

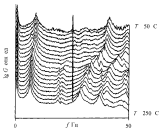


Рис. 6.6. Зависимость АСПМ сигнала ДПД, установленного в «горячем» трубопроводе петли, при изменении температуры ТН от 50 до 250 °С (блок II КсА3С)

разделяются геометрией ГЦК, температурой ТН и наличием паровой (газовой) фазы в ГЦК. Иными словами, всякий раз в процессе очередного разогрева РУ однажды выявленные из «подопласта спектров» температурные зависимости для АСВ должны в точности воспроизводиться. Если это не так, то необходимо проверить ТН на наличие парогазовых составляющих. Их появление в ГЦК сдвигает резонансы АСВ влево по оси частот и ухудшает их добротность (уширяет резонансы) по сравнению с однофазным ТН.

Далее при выводе блока на номинальные эксплуатационные параметры исследуются мощностные зависимости нейтронного шума, несущие информацию и о вибросостоянии РУ, и о теплогидравлическом состоянии АзЗ. Во всех этих экспериментах важно с достаточно мелким шагом пройти достаточно широкие диапазоны изменений давления ТН в ГЦК, средней температуры ТН и мощности реактора с тем, чтобы разделить резонансы на группы, к каждой из которых будут привлечены свои методы интерпретации.

Кроме того, в процессе разогрева блока последовательно увеличивается число функционирующих ГЦН. В результате в петлях создаются разные условия возникновения вибраций. Вибрации пассивных петель (там, где еще отключены ГЦН) будут происхо-

дать на собственных частотах под воздействием удаленных возбуждающих сил, что улучшает отношение сигнал/шум в задачах определения пространственных форм колебаний. Несимметричное расположение работающих ГЦН по отношению к вертикальной оси симметрии реактора создает неуравновешенный гидродинамический напор ТН, отклоняющий внутрикорпусную шахту от равновесного положения в известном направлении и провоцирующий соударения в шпоночных соединениях. Такой эксперимент предоставляет информацию для выявления диагностических признаков, сопровождающих соударения ВКУ.

Некоторые собственные частоты вибраций ВКУ и ТВС меняются с изменением скорости ТН. Разному числу функционирующих ГЦН соответствуют свои значения собственных частот. Монотонное увеличение числа функционирующих ГЦН при разогреве блока приводит к монотонному изменению собственных частот вибраций ВКУ и ТВС. Такие зависимости дают дополнительную информацию по интерпретации собственных частот ВКУ и ТВС. При этом следует учитывать, что с увеличением числа функционирующих ГЦН при разогреве блока увеличиваются и температура ТН, и давление в контуре.

Динамика выбросостояния элемента конструкции РУ при включении ГЦН также предоставляет ценную диагностическую информацию. Она может быть получена не только анализом переходных процессов во времени, но и оцениванием спектральных характеристик во времени. На рис. 6.7 приведены текущие АСПМ некоторых сигналов СВШК при включении ГЦН 1 в начале процесса разогрева блока. На рис. 6.7,а изображены АСПМ сигнала по поперечному ДОП, установленного на этом ГЦН, а на рис. 6.7,б — соответствующие функции времени.

Виброперемещения ГЦН в переходном процессе характеризуются не только затухающим низкочастотным осциллирующим процессом, время жизни которого порядка 100 с, но и мощным компонентом вибраций с частотой 9 Гц. Эта частота является собственной частотой вибраций ГЦН и, как следует из рис. 6.7,б, на котором изображены те же АСПМ, что и на рис. 6.7,а, но в логарифмическом масштабе, она присутствует в АСПМ и в установившемся режиме с гораздо меньшей амплитудой. В переходном процессе увеличиваются амплитуды всех спектральных составляющих, среди ко-

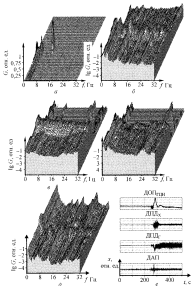


Рис. 6.7. Текстуры АСПМ сигналов DOP_{GSM} (а – в линейном масштабе, б – в логарифмическом), DOP_X (б), DOP_Y (в), DAP (г) и соответствующие реализации процессов при включении ГЦН-1 (а) (блок II КсАЭС)

торых обратная частота ГЦН не является доминирующей. На рис. 6.7, б можно увидеть спектральные составляющие, которые присутствуют только в переходном процессе. Такие параметры переход

ного процесса, как максимальная амплитуда виброперемещения при включении ГЦН, длительность переходного процесса, амплитуды доминирующих спектральных составляющих несут информацию о состоянии опор ГЦН и о качестве его балансировки.

Заметим, что по действующим нормам вибросостояние ГЦН определяется интегральным уровнем вибраций и амплитудой вибраций на оборотной частоте в установившемся режиме функционирования.

Пульсации давления ТН в том же холодном трубопроводе (см. рис. 6.7,в), что и рассматриваемый ГЦН, в переходном режиме несут вынужденный широкополосный характер с повышенными амплитудами. Они напрямую связаны с расходной характеристикой ГЦН. АСВ начинают доминировать в АСПМ сигнала ДПД_х только в установившемся режиме.

Пульсации давления ТН в горячем трубопроводе той же петли (см. АСПМ сигнала ДПД_г на рис. 6.7,з), в которой находится рассматриваемый ГЦН, имеют короткий переходный процесс. Это результат затухания фронта возмущения пульсаций ТН со стороны холодного трубопровода, который характеризуют гидравлические свойства реактора и, в частности, гидравлические свойства АКЗ.

Вибрации корпуса реактора (см. рис. 6.7,д) до включения ГЦН «фонсходили» в «стоячей» воде под действием маломощных возбудителей, например, подпиточных насосов. Поэтому частоты и амплитуды вибраций корпуса существенно отличаются от данных характеристик после включения ГЦН. Вибросостояние корпуса будет скачкообразно изменяться после включения каждого следующего ГЦН. Отсюда может быть почерпнута информация о состоянии узлов крепления ВКУ.

Данные эксперименты отличаются значительным объемом шумовой информации. В них акцент направлен не на оперативную интерпретацию измерений в ходе эксперимента, а на архивизацию с последующим отсроченным анализом.

Если АСВ являются одной из причин, из-за которых в ГЦК возбуждаются вибрации, то бегущие волны давления, напротив являются следствием этих вибраций. Совокупность частот и амплитуд БВД, полученных по сигналам ДПД, также характеризует вибросостояние РУ, как и множество частот и амплитуд собственных колебаний различных ее элементов полученных напри-

мер, по сигналам вибродатчиков. Однако на практике их редко используют, так как пространственные декременты затухания БВД неизвестны, а фазовые портреты неопределенны.

Если в течение одной кампании возможны монотонные и не большие изменения амплитуд и собственных частот колебаний элементов РУ то от кампании к кампании возможны значительные их изменения, обусловленные следующими причинами:

результатами ремонтных работ, которые, в частности, направлены на улучшение виброхарактеристик элементов ГЦТ (главным образом ГЦН);

изменением местоположения основного оборудования ГЦТ после цикла расхолаживания – разогрев;

изменением температурного режима ГЦТ

Например, на блоке I КоАЭС в двух последовательных топливных циклах достигалась разная средняя температура ТН: 279,9 °С (конец 21-го ТЦ, 1997 г.) и 272,7 °С (начало 22-го ТЦ, 1998 г.). В табл. 6.1 и на рис. 6.8 показаны соответствующие изменения центральных частот резонансов АСВ

Монотонные зависимости (см. табл. 6.1) свидетельствуют о том, что с увеличением номера АСВ растут и абсолютный, и от

Таблица 6.1 Температурные зависимости центральных частот АСВ

Номер АСВ	Номер ТЦ	Центральная частота АСВ, Гц	Разность частот Δf , Гц	Температурный коэффициент $\Delta f/\Delta T$, Гц/град	Нормированный температурный коэффициент $\Delta f/(N_p \Delta T)$, град
	21 22	6,312 6,469	0,157	0,022	3,5
2	21 22	18,880 19,380	0,500	0,060	3,6
3	21 22	29,010 29,880	0,870	0,113	4,0
4	21 22	37,220 38,608	1,388	0,193	5,2
5	21 22	45,270 47,380	2,110	0,293	6,5

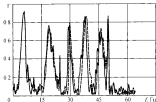


Рис. 6.1. Функция когерентности сигналов ДПД, установленная в одной петле, в экспериментах на блоке I КоАЭС в 1997 г. (сплошная кривая) и 1998 г. (пунктирная кривая)

носительный (нормированный на центральную частоту) температурные коэффициенты, определяющие местоположения резонансов АСВ на оси частот. Иными словами, высшие гармоники АСВ весьма чувствительны к изменениям температуры ТН, например изменение температуры ТН на 1,2 °С вызвало сдвиг 5-й АСВ на 2 Гц. Это подтверждает гипотезу о возможности обнаруживать ранние стадии кипения ТН по положению на оси частот высших гармоник АСВ. Известно, что зависимости частот АСВ от паро-содержания ТН обладают большей крутизной, чем аналогичные температурные зависимости для однофазного ТН [2].

Температурные зависимости немонотонного изменения собственных частот вибраций элементов ГЦК, вообще говоря, не должны воспроизводиться от одного разогрева блока к другому. Изменение жесткостей опор основного оборудования, жесткостей узлов крепления ВКУ, увеличение зазоров контактирующих поверхностей разделителя потока и шпоночных соединений вследствие процессов износа изменяют и соответствующие температурные зависимости собственных частот. Отсюда, впрочем, не следует, что эти зависимости не надо анализировать. Например, по публикации немецких специалистов [3, 4] можно сделать вывод, что вибронизмерения при разогреве блока средствами СВНД, которые пока не практикуются на отечественных АЭС, дают ценную информацию о качестве прошедшего ППР.

6.4 Виброшумовой контроль при эксплуатации опытных ТВС

Зарубежные и отечественные фирмы-производители топлива для АЭС находятся в непрерывном процессе его модернизации и в поиске новых конструкторских решений ТВС. Основная цель этих разработок — улучшение характеристик надежности и таких важных, с точки зрения конкурентоспособности ТВС, показателей как длительность топливного цикла, глубина выгорания, цена и т.д. [5—7].

В настоящее время (2003 г.) в России на двух блоках Калининской АЭС проводится опытная эксплуатация ТВС альтернативной конструкции (ТВСА) разработки ОКБМ (г. Нижний Новгород) на Балаковской и Ростовской АЭС — усовершенствованном ТВС (УТВС) разработки ФУГП ОКБ «Гидропресс». Причем, если на КЛНАЭС и БалаАЭС опытные ТВС последовательно замещают старые выгоревшие ТВС в процессе каждой перегрузки, то первая загрузка активной зоны ВДАЭС сразу полностью осушествлена УТВС. Гидропресс начал опытную эксплуатацию еще одной новой конструкции ТВС (ТВС-2) на БалаАЭС. Таким образом в настоящее время в опытной эксплуатации находятся три типа новых ТВС только для ВВЭР-1000.

Усовершенствованная ТВС по сравнению с серийной ТВС ВВЭР 1000 (проект В-320) отличается следующим [8]:

- увеличением рабочего хода пружинного блока головки ТВС (примерно в 2 раза) с одновременным уменьшением его жесткости (примерно в 2-4 раза), в результате чего существенно понижено поджатие ТВС

- применением более релаксационно стойкого материала пружин

- индивидуальным поджатием пружины каждого НК

- заменой нержавеющей НК и ДР циркониевыми

Отличительными особенностями ТВС-2 являются жесткий силовой каркас, образованный непосредственной приваркой ДР к НК и уменьшенное усилие проскальзывания твэлов в ДР [9-11].

Отличительной особенностью ТВСА является жесткий силовой каркас, образованный шестью уголками и ДР [12-15].

Источниками оперативных данных о работоспособности ТВС в процессе опытной эксплуатации являются радиационный и хи

мические анализы проб ТН, а в процессе перегрузки топлива — результаты КГО, геометрические измерения, предпусковые контрольные замеры характеристик органов СУЗ и визуальный осмотр.

Отсутствие отказов твэлов считается очень важным показателем качества по итогам эксплуатации опытной ТВС. Выполнение этого требования, однако, не доказывает, что качество ТВС достигло мирового уровня. Строго говоря, и наличие отказов твэлов в процессе опытной эксплуатации еще не свидетельствует о том, что топливо некачественное. Покажем это на простом примере.

Пусть в АкЗ находится N одинаковых твэлов, у каждого из которых интенсивность отказов λ , год⁻¹. Активная зона ВВЭР-1000 состоит из $N=50\,000$ твэлов, а лучшие мировые образцы ТВС имеют интенсивность отказов твэлов λ , равную $(1,0 \div 1,5) \cdot 10^{-6}$ год⁻¹. Иными словами, за год из миллиона твэлов в среднем отказывают всего один — полтора. Если предположить, что вероятность безотказной работы твэла подчиняется экспоненциальному закону $p(t) = \exp(-\lambda t)$, что общепринято для описания случайного характера потока отказов, то среднее время наработки на отказ одного из N штук твэлов описывается простой формулой $T_0 = 1/N\lambda$. Среднее время наработки на отказ в зависимости от интенсивности отказов твэлов приведено ниже.

λ , год ⁻¹	T_0
$1,0 \cdot 10^{-6}$	20 лет
$1,5 \cdot 10^{-6}$	13 лет
$5,0 \cdot 10^{-6}$	4 года
$1,0 \cdot 10^{-5}$	2 года

Допустим, удалось разработать такие ТВС, у которых при опытной эксплуатации в течение пяти лет не зафиксирована ни одна разгерметизация твэлов. Как следует из вывода (см. выше), это еще не означает, что достигнут лучший мировой уровень: до первой разгерметизации надо «простоять» в среднем 13–20 лет (гипотетически — конечно). Как и наоборот, ТВС, у которых твэлы отказывают с интенсивностью $\lambda = 1,0 \cdot 10^{-5}$, год⁻¹, по современным понятиям считаются уже не удовлетворительными, однако у них в среднем только через 2 года откинет первый твэл. Речь идет о среднем времени наработки на отказ — поэтому существует доволь-

но большая вероятность того, что и в течение четырех лет не откажет ни один твэл. Выйти из этой неопределенности можно было бы, резко увеличив статистику, т.е., увеличив число блоков АЭС на которых происходит опытная эксплуатация ТВС. Но это противоречит основному принципу опытной эксплуатации, в соответствии с которым массовый тираж начинается только после успешного завершения опытной эксплуатации.

Подчеркнем особо, что выше речь шла о новых перспективных ТВС ВВЭР. Существующая многолетняя статистика по интенсивности отказов твэлов примерно на порядок хуже, чем та, которую предъявляют к современным ТВС. Покажем это на примере ВВЭР-440. Усредненная за 25 лет эксплуатации различных блоков ВВЭР-440 интенсивность отказов твэлов [16] составила $\lambda = 3,5 \cdot 10^{-5}$, год⁻¹. Интенсивности отказов твэлов по различным блокам АЭС, полученные усреднением с момента пуска блока по 1996 г. приведены ниже:

Энергоблок	λ , год
Европейские PWR	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Блоки I, II КоАЭС (проект В-230)	$2,9 \cdot 10^{-5}$
АЭС Левинга (проект В-213)	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Японские PWR	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Блоки III, IV КоАЭС (проект В-213)	$1,6 \cdot 10^{-5}$

С учетом статистического разброса можно утверждать, что оценки в первых трех строках этого вывода, как и среднее по всем ВВЭР-440 — $\lambda = 3,5 \cdot 10^{-5}$, год⁻¹ — характеризуют примерно одно и то же качество топлива и его эксплуатации. Существенное отличие данного показателя между первыми двумя блоками КоАЭС и блоками III, IV КоАЭС (в 18 раз), по видимому, объясняется конструктивными отличиями проектов В-230 и В-213. Хотя на АЭС Левинга (см. выше) интенсивность отказов на порядок выше, чем на блоках III и IV КоАЭС при одинаковых проектах РУ. Это еще раз свидетельствует о том, что поток отказов твэлов управляется многими факторами и, как случайный процесс, является нестационарным, непуассоновским, кратным и неоднородным импульсным потоком.

Если обратиться к начальному опыту НВАЭС, то в первые 3 года эксплуатации первого ВВЭР-440 был достигнут уровень 0,05%

газонеплотных твэлов от общего числа твэлов, работающих в реакторе [17], а допускался тогда уровень 1% газонеплотных твэлов. При этом, что условия эксплуатации ТВС с каждым годом становятся все более жесткими (увеличивается глубина выгорания и срок эксплуатации), современная статистика отказов твэлов, ежегодно представляемая на конференциях, организованных ОАО «ТВЭЛ» и ФГУП ОКБ «Гидропресс», для лучших типов реакторов демонстрирует монотонное улучшение параметров надежности ТВС. Чтобы показать эту тенденцию, приходится изменять интервал усреднения, на котором вычисляются данные параметры. Например, для проекта В-213 — самого благополучного в этом смысле проекта ВВЭР-440 — достигнут уровень лучших мировых образцов ТВС [9, 18]. Изменение интенсивности отказов твэлов λ , год⁻¹ в зависимости от временного интервала усреднения см. ниже:

Временной интервал усреднения	λ , год
1992—2001 г	$6,8 \cdot 10^{-6}$
1998—2002 гг	$3,8 \cdot 10^{-6}$
1999—2003 гг	$1,4 \cdot 10^{-6}$

Отказы твэлов — очень редкие события — поэтому статистические выводы недостоверны именно из-за того, что объем выборки (число отказавших твэлов) очень мал. Если же произошел массовый отказ твэлов, то его причина, очевидно, носит не случайный характер, т. е. статистические методы опять неприменимы.

В рассмотренной выше простейшей модели заложен так называемый пуассоновский поток отказов, события в котором происходят независимо друг от друга. На самом деле, твэлы часто отказывают по одной общей причине (так называемые кратные события, т. е. групповые отказы твэлов), которая является внешней, не обусловленной собственными свойствами ТВС. В экспериментальном исследовании [16], обобщающем 25-летний опыт эксплуатации КоАЭС, сделан вывод о том, что не более четверти случаев разгерметизации твэлов вызваны особенностями эксплуатации. Иное мнение у специалистов завода-изготовителя ТВС [18]: «основная причина разгерметизации твэлов (дебриз-повреждения, фреттинг-износ) носит эксплуатационный характер и не связана с изготовлением топлива. Опыт эксплуатации топлива в реакторах ВВЭР 440 (особенно для типа В 230) показал необходимость

внедрения виброустойчивых конструкции защиты топливных кассет от посторонних предметов с помощью антидебризных фильтров». Представитель Генерального конструктора [9] указывает на следующие причины значительного отличия статистик от казов проектов В-213 и В-230.

особенности теплогидравлического тракта В-230,
дополнительная гидродинамическая неустойчивость при попадании посторонних предметов,
недостаточный запас виброустойчивости ТВС для указанных условий.

Таким образом качество эксплуатации и конкретные особенности блока АЭС на котором производится опытная эксплуатация ТВС являются дополнительными факторами неопределенности, по которым статистические выводы об опытной эксплуатации могут быть не убедительными.

С одной стороны, стендовые испытания не гарантируют декларируемый ресурс опытных ТВС, а с другой стороны объем измерений в эксплуатационных условиях недостаточен. В процессе опытной эксплуатации ТВС необходимо отыскивать источники дополнительной информации о качестве ТВС и его деградации во времени. Такая дополнительная информация может предоставляться виброшумовыми измерениями в процессе опытной эксплуатации.

Если теплотехнические условия, в которых эксплуатируется опытная ТВС, контролируются штатными средствами измерения (поканальные температуры ТН на выходе ТВС, энерговыделение по высоте ТВС), то штатных виброизмерений ВКУ и ТВС на ВВЭР-1000 не производится. В то же время именно оперативное измерение виброхарактеристик ТВС (частот амплитуд и мод колебаний) позволяет:

на ранней стадии выявлять дефекты конструкции связанные с формоизменением ТВС, с недопустимым изменением жесткостных свойств элементов ТВС и в частности пружинных блоков ТВС;

контролировать поканальные скорости ТН и другие условия гидродинамического нагружения ТВС со стороны потока ТН что крайне важно, вследствие того, что в контурах различных проектов ВВЭР наблюдаются разные по величине и спектральному составу пульсации давления ТН;

выявлять непроектные случаи закрепления ТВС, например, та кой как всплытие ТВС из-за недостаточного прижимного усилия со стороны БЗТ и/или высокой скорости ТН и/или релаксации пружинного блока ТВС;

управлять процессом модернизации опытных ТВС, например, оп ределять, как предпринятые в процессе опытной эксплуатации из менения ширины уголка несущей конструкции ТВСА скажутся на ее жесткостных характеристиках, что, в свою очередь, изменит амплитуду и частоту вибраций, а значит, и виброизнос ТВС в целом,

получить после окончания испытаний (в идеале после пяти лет опытной эксплуатации) трендовые характеристики «медленных» изменений спектральных образов вибраций ТВС, которые позво лят оценить характеристики деградации жесткостных и прочно стных свойств ТВС, т. е. экспериментально подтвердить виброфе сурс ТВС в эксплуатационных условиях и не в модельных стен довых испытаниях.

При наличии верифицированной полномасштабной вибра ционной модели ТВС, найденные экспериментально изменения их виброхарактеристик могут быть интерпретированы в терминах из менения жесткостей элементов ТВС.

Основной инструмент получения дополнительной информации о качестве опытной ТВС — анализ трендов виброхарактеристик. Как показывает зарубежный опыт, частота виброшумовых измерений должна быть увеличена: если в нормальных условиях эксплуатации при загрузке активной зоны штатными ТВС периодичность изме рений средствами СВШК составляет величину порядка одного раза в месяц, то при опытной эксплуатации топлива — 1 раз в неделю.

Увеличение частоты виброшумовых измерений средствами СВШК должно также назначаться при продлении срока эксплу атации блока АЭС.

Список литературы

1. Система пусконаладочных измерений при вводе в эксплуатацию энергоблока №1 Ростовской АЭС / Ю.Г.Драгунов, А.В.Селезнев, В.У. Хайрединов и др. // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Сб трудов 2-й Всероссийской научно-технической конференции 19—23 но ября 2001, Подольск.

2. **Виброакустическая диагностика эксплуатационных режимов обору**

домания / К.Н. Проскуряков, В.С. Мухин, В.Ц. Горбунов и др. // Атомные электрические станции. Сб. статей / Под ред. Л.М. Воронина. М: Энергоатомиздат, 1988, № 10. С. 236—241.

3. Experiences and results with COMOS — an on-line vibration analysis and monitoring system / R. Sunder, M. Balzanu, K. Kieninger et al. / Proc. SMORN VI 1991, Vol. 1. P. 5.01—5.12.

4. Kolbassoff A., Sunder R. Lessons learned with vibration monitoring systems in German nuclear power plants (SMORN-VIII) // Prog. Nucl. Energy 2003, Vol. 43, N 1—4. P. 159—165.

5. Molchanov V. Perspective decisions of VVER nuclear fuel implementation at Russian NPPs // Proc. 5-th International conference on WVER fuel performance modelling and experimental support. 29 September — 3 October 2003, Albena, Bulgaria.

6. Killeen J. IAEA programme on nuclear fuel cycle and materials technologies // Ibid.

7. Results of post-irradiation examination of WVER-1000 uranium fuel rods and uranium-gadolinium fuel rods to validate 4 and 5-Year fuel cycles / A. Smirnov, D. Markov, V. Smirnov et al. // Ibid.

8. Основные технические решения по повышению безопасности и экономичности оборудования реакторных установок для АЭС «Тиньяны», «Бушер» и II очереди НВАЭС / А.И. Репин, С.Б. Рыков, Ю.Л. Бочаров и др. // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Сб. трудов 2-й Всероссийской научно-технической конференции 19—23 ноября 2001. Под редакц.

9. Vasilchenko I.N., Ananyev Y.A. New requirements for the WVER fuel and their consideration in designing the fuel assemblies. Vasilchenko, Yu.A. Ananyev // Proc. 5-th International conference on WVER fuel performance modelling and experimental support, 29 September — 3 October 2003, Albena, Bulgaria.

10. Экспериментальное обоснование конструкции тепловыделяющего сборов ВВЭР-1000 нового поколения на ОАО «НЭЭК» / А.А. Енин, В.В. Рожков, Ю.Г. Синников и др. // Ibid.

11. Lessons learned from the computational simulation of thermomechanical behaviour of the WVER-1000 reactor cores: FA development and its implantation into the Balakovo NPP unit 1 / V Troyanov, Y Likhatchev, V Fokimov, A. Demishonkov // Ibid.

12. Альтернативное топливо ВВЭР 1000. Концепции. Конструкции. Результаты опытной эксплуатации / О.Б. Самойлов, В.Б. Кайдалов, А.К. Панюшкин и др. // Сб. докл. 3-го международного семинара «Использование, моделирование и экспериментальная поддержка топлива для ВВЭР». 4—8 октября 1999 г., Пампорово, Болгария.

13. Итоги создания и эксплуатации ТВС альтернативной конструкции в реакторе ВВЭР-1000 первого блока Калининской АЭС / О.Б. Самой-

лов, В.С. Кузль, Д.Г. Преображенский и др. // Материалы международной конференции TOPFUEL-2001, 27–30 мая 2001 г., Стокгольм, Швеция.

14. Итоги создания и дальнейшего совершенствования ТВС альтернативной конструкции для реактора ВВЭР-1000 / В.Л. Мосманов, А.К. Пакишкин, В.М. Железняк и др. // Сб. докл. международной конференции «Атомные электростанции на пороге 21 века» 8–10 июня 2000 г. – Электро-сталь. С. 412–428.

15. Molchanov V., Kaldarov Y., Samoilov O. The results of AFA operation at Kalinin NPP and the trends of further perfection of the fuel based on AFA // Proc. 3-th International conference on WWER fuel performance modelling and experimental support, 29 September – 3 October 2003, Albena, Bulgaria.

16. Колчанов Ю.В., Оселович В.В., Пытков Ю.Н. и др. Повышение эффективности топливониспользования и совершенствование систем обращения с ядерным топливом на АЭС с ВВЭР-440 / С.-Пб., 2000.

17. Десятилетний опыт эксплуатации Нововоронежской АЭС. Сентябрь, 1974 // Материалы научно-технической конференции. Нововоронеж.

18. Анализ результатов эксплуатации ядерного топлива ВВЭР-440 / А.А. Карюшкин, С.Н. Балабанов, Е.А. Сидорова, В.Е. Чирков // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Сб. трудов 3-й Всероссийской научно-технической конференции. 26–30 мая 2003 г., Подольск.

Нейтронный шум ВВЭР

7.1. Простые модели возмущения вибрации ВКУ и ТВС на нейтронный поток

Изменение тока нейтронного детектора при вибрациях ВКУ и ТВС связано с изменением геометрии в системе «топливо-замедлитель-детектор»:

- эффект глобального возмущения реактивности;

- эффект локального (в пределах некоторой части активной зоны) изменения потока тепловых нейтронов вследствие изменения геометрии в системе топливо-замедлитель;

- эффект изменения границ активной зоны при вибрациях шахты

- эффект вынужденных вибраций вследствие пульсаций давления ТН и в частности – вибрации на частотах акустических стоячих волн;

- эффект модуляции быстрых нейтронов утечки вследствие изменения водяного зазора между корпусом и периферийными твэнами.

Перечисленные эффекты могут регистрироваться как вне-, так и внутризонными нейтронными детекторами, если только детекторы не удалены на значительное расстояние от рассматриваемого эффекта.

До экспериментальных работ Крантера на АЭС Pahzadeh другой американский исследователь Тай, уже предлагал практически ценный шумовой метод контроля вибраций шахты АкЗ в FWR с помощью внезонных нейтронных детекторов. Им впервые была высказана идея о том, что флуктуации тока ионизационной камеры $\delta i(t)$, нормированные на среднее значение ее тока i_0 , пропорциональны флуктуациям толщины водяного зазора в опускном участке между шахтой и корпусом реактора $\delta x(t)$

$$\frac{\delta\alpha(t)}{t_0} = \text{const } \delta x \quad (7.1)$$

Для доказательства справедливости последнего выражения предположим, что интенсивность стационарного нейтронного потока, падающего на шахту со стороны активной зоны, неизменна по азимуту и составляет величину N_0 . Пусть также неизменны флуктуации перемещений шахты по азимуту вследствие ее вибраций и описываются случайным числом δx , а проектная величина водяного зазора шахта-корпус составляет величину x . Нейтронный поток, фиксируемый ИК, состоит из стационарного значения N_1 и флуктуирующей величины δN_1 . Флуктуации нейтронного потока связываются только с перемещениями (флуктуациями) шахты δx .

Если считать характер затухания нейтронного потока при его прохождении водяного зазора экспоненциальным, то величина нейтронного потока на ИК записывается в виде

$$N + \delta N = N_0 \exp[-\mu(x + \delta x)]$$

где μ — константа затухания, которая пропорциональна макроскопическому сечению поглощения нейтронов в воде и зависит от температуры ТН и концентрации борной кислоты.

Для разделения детерминированной и случайной частей представим данное уравнение следующим образом:

$$N + \delta N = N_0 \exp(-\mu x) \exp(-\mu \delta x) = N_0 \exp(-\mu x) (1 - \mu \delta x)$$

Приближение экспоненты в виде линейной функции правомочно вследствие малости флуктуаций δx . Теперь, если раздельно приравнять детерминированные и случайные части слева и справа от знака равенства последнего уравнения, то получим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} N_1 = N_0 \exp(-\mu x) \\ \delta N = (-\mu \delta x) N_0 \exp(-\mu x) \end{cases}$$

Отсюда нормированные флуктуации тока нейтронной камеры $\delta i/i$, совпадающие с нормированным нейтронным потоком $\delta N/N_1$, запишутся в виде

$$\frac{\delta i}{i} = \frac{\delta N}{N_1} = -\mu \delta x$$

В многочисленных работах [1—6] было найдено, что константа в формуле (7.1) равна $0,15 \pm 0,03 \text{ см}^{-1}$ для широкого класса конструкций водо-водяных реакторов. Таким образом, простейшая модель (7.1) дает возможность оценивать абсолютные виброперемещения шахты с помощью косвенных измерений нейтронного шума. В большом числе экспериментальных работ получено, что СКЗ колебаний шахт реакторов типа РВР с электрической мощностью из диапазона 350—1300 МВт лежит в пределах 20—60 мкм с центральной частотой в пределах 5—11 Гц [4]. Тем не менее следует учитывать, что величина $\text{const} = 0,15 \pm 0,03 \text{ см}^{-1}$ не является мировой константой, а зависит от температуры теплоносителя, концентрации борной кислоты, мощности реактора (хотя и слабо), так как от этих параметров зависит плотность воды в зазоре корпус-шахта, а значит и макроскопическое сечение поглощения нейтронов.

Таким образом, к середине 70-х годов из экспериментальных работ Крайтера стало понятно, по каким характерным особенностям спектральных функций флуктуаций ИК выявлять колебания шахты, а из метода Тая — как измерять в абсолютных единицах виброперемещения шахты.

Помимо собственных жесткостных и демпфирующих свойств, вибрации ТВС во многом определяются также и условиями их закрепления в верхней (головка ТВС) и нижней (хвостовик ТВС) частях. Возможны коллективные вынужденные вибрации ТВС, если опорная плита, в которую устанавливаются хвостовики ТВС, движется вследствие вибраций шахты. Тогда на этой частоте амплитуда вибраций ТВС в нижней части будет больше, чем в верхней, и амплитудное распределение СКЗ внутризонного нейтронного шума будет иметь монотонно убывающий (с увеличением номера ДПЗ) вид. Недостаточно зажаты вертикальным усилием со стороны БЗТ ТВС будут иметь шарнирно закрепленную голо-

ику, и тип колебаний будет отличаться от типа колебаний ТВС с двумя жестко закрепленными концами. В этом случае амплитуда вибраций головки ТВС будет больше чем хвостовика ТВС. Потеря жесткости пружинного блока ТВС также сопровождается уменьшением собственной частоты вибраций ТВС и ухудшением добротности резонанса (его уширением).

7.2 Возможности шумового анализа сигналов ДПЗ

Анализ шумов ДПЗ по так называемой мгновенной или быстрой компоненте сигнала в стационарных условиях эксплуатации РУ значительно расширяет наблюдаемость активной зоны. В частности, ДПЗ чувствительны как к теплогидравлическим, так и к вибрационным источникам внутризонного нейтронного шума [7–8]. Эти источники могут как конкурировать друг с другом, находясь в одном частотном диапазоне, так и занимать индивидуальные частотные полосы, или даже представлять собой дискретные линии.

Теплогидравлические источники позволяют контролировать входные возмущения реактивности (флуктуации температуры и расхода ТН на входе в активную зону $\delta T_A(\omega)$, $\delta Q(\omega)$), а транспорт этих источников вместе с потоком ТН по высоте РК дает возможность измерять поканальную скорость ТН шумовым методом. К этому же типу источников относят и кипение ТН. Оно возможно и как аномальное явление, связанное, например, с блокированием потока ТН через РК с непроектным гидравлическим сопротивлением, и как допустимое проектом явление недогретого кипения в теплонапряженных РК.

Вибрационные источники возникают вследствие геометрических микронематений гетерогенной структуры в системе топливо — замедлитель — поглотитель по отношению к ДПЗ при совместных или индивидуальных колебаниях корпуса реактора, шахты реактора, РК, органов регулирования на собственных или вынужденных частотах. И, если вибрации корпуса реактора обычно контролируются датчиками абсолютных перемещений, а виброперемещения шахты реактора — совокупностью ионизационных камер и ДАП, то анализ сигналов ДПЗ дает новую информацию о вибрациях РК. АРК и дополнительную информацию о вибрациях шахты.

ДПЗ более, чем внезонные детекторы нейтронного потока, чувствительны к барометрическим нейтронным эффектам, которые всегда присутствуют в активной зоне вследствие наличия акустических стоячих волн [9]. Они модулируют плотность ТН, тем самым, модулируя процесс термализации быстрых нейтронов. Если ионизационные камеры чувствительны к низкочастотным длинноволновым акустическим волнам, полупериод которых больше габаритных размеров активной зоны, то ДПЗ, помимо этого, чувствительны и к высокочастотным коротковолновым акустическим полям, которые модулируют нейтронный поток в непосредственной близости от ДПЗ. Аналогично и турбулентное течение ТН, вызывающее микронизменения плотности и скорости ТН в окрестности ДПЗ, является широкополосным (нерезонансным) источником локального нейтронного шума.

Локальный НШ, очевидно, несет информацию об уровнях пульсаций давления ТН, которые представляют собой внешнюю вынуждающую вибрации ВКУ, РК и АРК, силу. Функция когерентности сигнала ДПЗ и сигнала ДАП позволяет среди множества вибрационных источников, наблюдаемых на корпусе РУ, выделить те, которые обусловлены вибрациями ВКУ. По условиям эксплуатации их нельзя контролировать прямыми измерениями (т.е. датчиками вибраций, установленными непосредственно на той или иной конструкции ВКУ), поэтому анализ сигналов ДПЗ расширяет возможности оперативного диагностирования при помощи косвенных измерений.

Как и внезонные нейтронные датчики, ДПЗ регистрируют и глобальный нейтронный шум. Он, в основном, доминирует на низких частотах и чаще всего представляет собой маскирующий эффект

7.3 Феноменологическая модель нейтронного шума

В соответствии с феноменологической теорией глобальности локальности ($G-L$ -теория) [10–11] флуктуации нейтронного потока в точке r записанные в частотной области имеют вид

$$\delta\Phi(\omega, r) = U_G(\omega) \delta p(\omega) \Phi(r) + \delta L(\omega, r) \quad (7.2)$$

где $\delta\rho(\omega)$ — флуктуация реактивности, $\Phi(r)$ — статистически пространственно распределенный нейтронный поток; $U_0(\omega)$ — передаточная функция «реактивность — нейтронный поток» для реактора нулевой мощности; $\delta L(\omega, r)$ — локальные флуктуации нейтронного потока в точке r .

Отсюда следует, что выражение для нормированных флуктуаций тока нейтронного детектора, установленного в точке r , состоит из пространственно независимого слагаемого (глобальный компонент) и локального компонента, описывающего нейтронный поток в непосредственной близости от детектора

$$\frac{\delta I(\omega, r)}{I(r)} = \frac{\delta\Phi(\omega, r)}{\Phi(r)} = U_0(\omega)\delta\rho(\omega) + \frac{\delta L(\omega, r)}{\Phi(r)} \quad (7.3)$$

Вибрации ВКУ и ТВС могут входить как в глобальный член так и в локальный.

Строго говоря, такой подход является весьма грубым. Многочисленными экспериментами на различных типах реакторов доказано, что глобальный компонент пространственно зависим [7, 12], т.е. приближение точечной нейтронной кинетики, которое и определяет его, является слишком упрощенным. Однако данная модель остается в силе (более того, является основным инструментом для интерпретации нейтронных шумов), если рассматривать не всю активную зону, а только некоторую ее часть. Например, в [13] показано что нейтронный поток в группе из соседних ТВС с высоким качеством описывается моделью (7.3). И, напротив, для диаметрально разнесенных по АкЗ ТВС понятие о глобальном компоненте можно применять только при очень низких частотах (менее 0.5 Гц).

7.4. Характерные признаки коллективных вибрации ТВС и вибраций шахты, получаемые по сигналам внешних ионизационных камер

В сигналах внешних ионизационных камер коллективные вибрации ТВС проявляются в точности так же, как и балочные (магнитные) колебания шахты АкЗ. Как правило, в АСПМ и все возможных функциях когерентности сигналов ИК присутствует резонанс на собственной частоте вибраций шахты — среди все

Таблица 7.1. Характерные значения фаз, рад., для трех направлений базовых колебаний шахты АкЗ и/или корпуса реактора и/или коллективных вибраций ТВС

Направление	НК1—НК2	НК1—НК3	НК2—НК3
1	0	π	π
2	π	0	π
3	π	π	0

возможных фаз на этой частоте обязательно существуют противофазы. Для трех НК фазовые соотношения будут принимать значения, представленные в табл. 7.1 и на рис. 7.1.

Вибрации ТВС вызывают периодические изменения расстояния между НК и АкЗ. При этом, как правило, изменяется толщина водяного зазора между шахтой АкЗ и корпусом реактора. Вибрации ТВС вызывают вынужденные маятниковые колебания шахты, которые модулируют поток нейтронов утечки вследствие изменений упомянутых выше водяных зазоров.

На рис. 7.2 схематично представлен данный механизм. В соответствии с $G-L$ -теорией флуктуации тока НК за счет колебаний толщины водяного слоя с амплитудой A запишутся в виде

$$\frac{\delta I(\omega, r)}{I(r)} - \frac{\delta \Phi(\omega, r)}{\Phi(r)} = U_0(\omega) \delta \rho(\omega) + A \mu \delta(\omega - \omega_0) \cos \theta \quad (7.4)$$

где θ — угол между направлением маятниковых колебаний шахты АкЗ и прямой, соединяющей НК с центром реактора; $\mu = \cos \alpha$.



Рис. 7.1. Характерные направления колебаний шахты АкЗ при трех НК

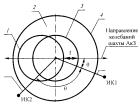


Рис. 7.1. Механизм возникновения тока НК при колебаниях штыря АсЗ: 1 — заостренное положение штыря АсЗ; 2 — поперечный срез в ослепленном участке; 3 — штырь АсЗ; 4 — корпус

$0,5 \text{ см}$ — коэффициент пропорциональности, связывающий амплитуду колебаний штыря с амплитудой флуктуаций нейтронного потока; $\delta(\omega - \omega_0)$ — дельта-функция; ω_0 — собственная частота колебаний штыря

Хотя в колебательное движение вовлечена вся активная зона и оно фиксируется удаленными детекторами нейтронного потока, тем не менее, данное явление описывается сглаженным локальным нейтронным шумом

Из (7.4) АСПМ НК1 запишется в виде

$$G_1(\omega, r_1) = W_p(\omega) + A^2 \mu^2 \delta^2(\omega - \omega_0) \cos^2 \theta \quad (7.5)$$

где $W_p(\omega) = |U_p(\omega)|^2 G_p(\omega)$ — реактивный компонент; $G_p(\omega)$ — АСПМ флуктуаций реактивности; r_1 — расстояние от центра НК1 до центра реактора; θ_1 — угол между направлением магнитковых колебаний штыря и прямой, соединяющей НК1 с центром реактора.

ВСПМ сигналов двух НК запишется из (7.4) в виде

$$G_{1,2}(\omega, r_1, r_2) = W_p(\omega) + A^2 \mu^2 \delta^2(\omega - \omega_0) \cos \theta_1 \cos \theta_2 \quad (7.6)$$

При благоприятном соотношении глобального и локального

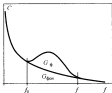


Рис. 7.3 Эффект от колебаний шахты на фоне глобального нестрессового шума

компонентов, когда первым можно пренебречь, внесем формулу с помощью которой оцениваем амплитуду вибраций:

$$A = \sqrt{\frac{1}{\mu \cos \theta_1 \cos \theta_2} \int_{\omega_{\min}} |G_{f_1 f_2}(\omega, \eta_1, \eta_2)| d\omega} \quad (7.7)$$

Как следует из выражения (7.7), эффект вибрации будет иметь максимальный вклад во ВСПМ, если $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$, т.е., если две ИК диаметрально разнесены по отношению к центру АкЗ и прямая, соединяющая их, лежит строго в направлении вибраций шахты АкЗ. И, напротив, достаточно одной из ИК находиться в перпендикулярном направлении, чтобы эффект вибраций во ВСПМ был нулевым.

Если глобальный шум сопоставим или даже превосходит локальный шум возникающий вследствие вибраций шахты, то и в АСПМ и во ВСПМ будет наблюдаться фоновый пьедестал (рис. 7.3) который необходимо исключить, в противном случае оценка амплитуды вибраций будет завышена.

7.5 Признаки, по которым обнаруживаются вибрации ТВС

7.5.1 Амплитудные признаки

В идеале дисперсия нормированных на постоянную составляющую шумов ДПЗ на частоте первой гармоник колебаний ТВС с двумя закрепленными концами как функция высоты z должна

повторить форму первой моды колебаний, т.е. должна иметь вид $\text{const} \cdot \sin^2(\pi x/H)$, где H — расстояние между верхней и нижней точками крепления ТВС (рис. 7.4).

Предполагается, что виброперемещения ДПЗ совместно с ТВС происходят в некотором ненулевом градиенте нейтронного поля. Тогда минимальные дисперсии следует ожидать в сигналах тех ДПЗ, которые близки к нижнему и верхнему концам ТВС (ДПЗ1 и ДПЗ7), а максимум дисперсии — в сигнале центрального ДПЗ4. Экспериментальная зависимость продемонстрирована на рис. 7.5.

Дисперсия флуктуаций сигналов ДПЗ на частоте второй гармоники (оба конца закреплены) как функция высоты должна иметь вид, изображенный на рис. 7.4, или в аналитической записи: $\text{const} \cdot \sin^2(2\pi x/H)$.

Распределение амплитуд флуктуаций сигналов ДПЗ на частотах вибраций шахты зависит от механизма воздействия данных вибраций на ток ДПЗ и от типа колебаний шахты. Если реализуется низший тип балочных колебаний с одним закрепленным верхним концом (при достаточно больших зазорах в виброгасителях шахты), то максимальное СКЗ будет наблюдаться на ДПЗ1 (т.е. нижнем), а минимум — на верхнем ДПЗ. Экспериментальная зависимость продемонстрирована на рис. 7.5.

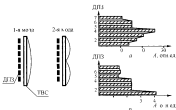


Рис. 7.4. Мода колебаний ТВС с двумя закрепленными концами

Рис. 7.5. Распределение амплитуд колебаний ТВС (блок I КМАЭС) на 1-й моде (2,6 Гц) (а) и второй на нижней моде (4,3 Гц) (б)

Вибрации ТВС — сосуществование двух крайних случаев: коллективное однонаправленное движение всех ТВС и индивидуальные, не связанные друг с другом колебания каждой ТВС на своих собственных частотах. В первом случае для фазовых соотношений сигналов ИК имеем полную аналогию с колебаниями шахты АкЗ. Иными словами при трех ИК на частоте коллективных вибраций некоторая пара сигналов будет синфазна, а две других гармы — противофазны.

Все сигналы ДПЗ одной ТВС на частоте первой моды колебаний ТВС синфазны (см. рис. 7.4). И хотя значения фаз между сигналами соседних ДПЗ получаются чаще всего близкими к нулю (т.е. ожидаемыми для 1-й моды вибраций ТВС), эта синфазность обусловлена глобальным нейтронным шумом и не имеет отношения к вибрациям ВКУ.

Еще одним мощным источником НШ являются АСВ. В ГЦК с четным числом петель существуют два типа АСВ [9]: первый — с узлом, совпадающим с вертикальной осью симметрии ГЦК, и второй — с пучностью на этой же оси. Для ВВЭР-1000 в номинальных условиях частота 1-й АСВ находится в районе 6,6 Гц, второй — 8,8 Гц. Каждая АСВ сопровождается своим рядом гармоник. Если учесть, что существует некоторое распределение узлов и пучностей в пределах корпуса реактора на частотах АСВ и гармониках АСВ, то получается, что маскирование вибрации ВКУ носит переменный в пространстве АкЗ характер как по азимуту, так и по высоте. В диагностических приложениях для оценки барометрического коэффициента реактивности используют частоты АСВ, а с помощью амплитуд АСВ определяют величину сил возбуждающих вибрации ВКУ.

При совпадении узла колебаний второй гармоники ТВС с центральным (четвертым) ДПЗ сигналы пар ДПЗ 2—6, 2—5, 3—6, 3—5 будут противофазны, а остальных пар — произвольны. В практических ситуациях узел колебаний 2-й моды, как правило, смещен относительно середины АкЗ (рис. 7.6). Вторая мода колебаний ТВС, расположенная на частоте 7,6 Гц, также попадает в диапазон мощных маскирующих эффектов АСВ (до 10 Гц). Здесь доминирует 1-я корпусная АСВ, поэтому 2-я гармоника не может

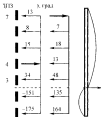


Рис. 7.6. Фазы сигналов ДПЗ на частоте 2-й моды вибрации ТВС (7,7 Гц) для пар ДПЗ с координатами 4—1, 4—2, 4—3, 4—4, 4—5, 4—6, 4—7 и для пар ДПЗ с координатами 7—4, 7—5, 7—4, 7—3, 7—2, 7—1; пространственное распределение (справа) амплитуд колебаний (блок I КлимАСС)

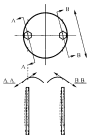


Рис. 7.7. Возникновение противофазности в разнознаковых градиентах нейтронного поля

быть надежным признаком вибрации ТВС. Тем не менее, ее можно выделить тщательным спектральным анализом высокого разрешения. На рис. 7.6 схематично представлены оценки фаз для двух семейств функций когерентности: 7—1, 7—2, 7—3, ..., 7—6 и 4—1, 4—2, ..., 4—7 на частоте 7,6 Гц, из которых следует, что узел колебаний второй моды ТВС находится между ДПЗ2 и ДПЗ3.

В сигналах ДПЗ, расположенных в разных ТВС, но в градиентах нейтронного поля одного знака на частотах вибраций также должна обнаружиться синфазность. Напротив для ТВС находящихся в разнознаковых градиентах — противофазность (рис. 7.7). Отсюда следует — мощный признак наличия коллективных колебаний ТВС на частоте вибраций всевозможные пары сигналов ДПЗ расположенных в разнознаковых градиентах противофазны.

Существенным фактором в подобных измерениях является выбор направления, по которому вычисляется данный градиент. Для этого необходимо рассчитать трехмерное нейтронное поле вертикальной плоскостью, параллельной направлению коллективных колебаний

ТВС и проходящей через данную ТВС. Очевидно, что вибрации ДПЗ в ТВС (см. рис. 7.7) происходят в разнознаковых градиентах нейтронного поля, а значит, присутствует и противофазность.

7.5.3 Гармонические и субгармонические признаки

Ток нейтронного детектора, как нелинейно преобразованная синусоида, в спектральном представлении является полигармоническим процессом (рис. 7.8). Таким образом, вибрации ТВС на частоте f порождают гармонический ряд $f, 2f, 3f, \dots$ в сигналах ДПЗ.

Существенно, что это ряд точных гармоник. То же самое относится и к рядам субгармоник, возникающих из-за соударений ВКУ. Это ряд точных долей частоты вынуждающей силы и, в частности, оборотной частоты ГЦН. И напротив, естественные (физические) гармоники, как правило, не являются точными рядами. Например, частоты первых двух гармоник вибраций ТВС, могут отличаться более чем в 2 раза. Гармоники АСВ вследствие сложной геометрии ГЦК также не являются точными. Их гармоническая принадлежность друг другу подтверждается соответствующими модами колебаний, но никак не точными соотношениями между частотами. Таким образом, наличие точного гармонического ряда в какой-либо спектральной характеристике сигналов ДПЗ является индикатором вибраций ТВС.

Ударные взаимодействия ВКУ и ТВС как сугубо нелинейные явления проявляются в спектральных характеристиках в виде резонансных частот $(p/q)F_{об}$ (субгармоник), где p, q — целые числа, $F_{об}$ — оборотная частота ГЦН [14]. Значения p и q зависят от отношения $F_{об}/F_c$, где F_c — собственная частота соударяющегося элемента, и могут принимать широкий спектр значений. Ударные контакты ДР соседних ТВС также приведут к наличию субгармоник оборотной частоты ГЦН в спектральных характеристиках ДПЗ.

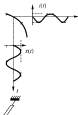


Рис. 7.8. Нелинейный эффект при коллективных вибрациях ТВС

7.5.4 Многомерные авторегрессионные признаки

Отличительным признаком вибрации ВКУ и ТВС при совместном рассмотрении флуктуаций нейтронного поля и поля давления ТН составляет многомерный авторегрессионный анализ (МАР-анализ); он способен указать на первоисточник того или иного резонанса. В приложении даются основные сведения из теории МАР-анализа.

На рис. 7.9 представлена МАР-модель, построенная на сигналах удаленных на значительное расстояние друг от друга датчиков: ДПД (Q4), ДПЗ, ИК (ИК7). Такая МАР-модель позволяет интерпретировать глобальные для АкЗ явления, дающие вклад в сигналы этих трех разнотипных датчиков. О первоисточниках того или иного резонанса можно судить по взаимным вкладам одного сигнала в другой (рис. 7.10).



Рис. 7.9. Схема расположения удаленных датчиков для проведения МАР-анализа (I блок КланЭС)



Рис. 7.10. Взаимные вклады сигналов ДПД, ИК и ДПЗ, %, на частотах колебаний ТВС (2,6 Гц) и шахты (4,7 Гц). Блок I КланЭС

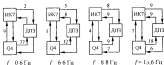


Рис. 7.11. Взаимные вклады сигналов ДПД, ИК и ДПЗ на частотах АСВ: 0,6 Гц — АСВ КД; 6,6 Гц — 1-я петля АСВ; 8,8 Гц — 1-я корпусная АСВ; 13,6 Гц — 2-я корпусная АСВ (Блок I КланЭС)

Для резонанса 4,7 Гц (см. рис. 7.10) доминирует сигнал ИК7, а не сигнал ДПД Q4, для которого вибрации шахты опосредуются не собственными колебаниями давления ТН, а затухающими бегущими волнами давления ТН. Это согласуется с предположением о том, что причиной происхождения данного резонанса являются колебания шахты. В происхождении резонанса 2,6 Гц «участвует» главным образом сигнал ДПЗ (вибрации ТВС).

Закономерная картина наблюдается на частотах АСВ (0,6, 6,6, 8,8; 13,6 Гц): вклады сигналов ДПД — ДПЗ и ДПД — ИК значительно превосходят обратные вклады (рис. 7.11).

7.6 Флуктуации тока ДПЗ при коллективных вибрациях ТВС

7.6.1 Общие положения

Механизм преобразования виброперемещения ТВС в ток ДПЗ до сих пор является предметом исследований. На рис. 7.12 представлен механизм преобразования коллективных колебаний ТВС в ток ДПЗ [8].

На рис. 7.12 изображены равновесное и два экстремальных положения функции $\Phi(r)$ — статического пространственного распределения нейтронного потока — и сигналы двух ДПЗ, расположенных в разнознаковых градиентах нейтронного потока. Как видно из рис. 7.12, сигналы противофазны и представляют собой нелинейно преобразованную синусоиду. Синхронное перемещение всех ТВС в каком-либо направлении является причиной изменения распределения нейтронного потока $\Phi(r)$ в пространстве. Если $\Phi(r)$ не является константой, и ДПЗ остается неподвижным

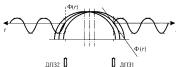


Рис. 7.12. Сигналы двух удаленных ДПЗ при колебаниях распределения статического нейтронного потока

из-за зазоров между измерительной гильзой и центральной трубой ТВС, то вслед за изменением $\Phi(r)$, вообще говоря, нелинейно будет изменяться и ток ДПЗ. На практике наблюдаются микроперемещения ТВС поэтому при описании тока ДПЗ вполне достаточно линейное приближение функции $\Phi(r)$, хотя точные гармониками ω_0 ($n = 2, 3, \dots$) частоты коллективных вибраций ω_0 так же можно выделить из сигнала ДПЗ.

Очевидно, что представленным механизмом обуславливает нелинейно-активный характер компонента тока ДПЗ, возникающего вследствие коллективных вибраций ТВС, т.е. он описывается слабым $\delta I(\omega, r)$. И хотя по происхождению этот механизм является локальным, вследствие наличия глобального посредника в виде функции $\Phi(r)$ сигналы удаленных ДПЗ (а тем более и соседних) коррелируют друг с другом на частоте ω_0 . При синусоидальном характере коллективных вибраций ТВС флуктуации нейтронного потока запишутся в виде

$$\delta\Phi(\omega, r) = U_0(\omega) \delta\varphi(\omega) \Phi(r) + A\lambda\delta(\omega - \omega_0) \Phi(r) \quad (7.8)$$

где U_0 — передаточная функция «реактивность — нейтронный поток»; A — амплитуда вибраций ТВС; λ — безразмерный коэффициент перехода от перемещений к нейтронному потоку; $\Phi'(r)$ — пространственная производная функции $\Phi(r)$, вычисляемая по направлению коллективных вибраций ТВС; $\delta(\omega - \omega_0)$ — δ -функция.

После нормирования на постоянную составляющую тока ДПЗ имеем

$$\frac{\delta I(\omega, r)}{I(r)} - \frac{\delta\Phi(\omega, r)}{\Phi(r)} = U_0(\omega) \delta\varphi(\omega) + A\lambda\delta(\omega - \omega_0) \frac{\Phi'(r)}{\Phi(r)}$$

где $\delta I(\omega, r)$ — флуктуации тока ДПЗ; $I(r)$ — постоянная составляющая тока ДПЗ; $\Phi'(r)/\Phi(r) = \ln' \Phi(r)$ — логарифмическая производная.

Если предположить, что глобальными и локальными компоненты некоррелированы то АСПМ флуктуаций тока ДПЗ будет иметь вид

$$G_I(\omega, r) = W_0^2(\omega) + A^2\lambda^2\delta^2(\omega - \omega_0) [\ln' \Phi(r)]^2 \quad (7.9)$$

Аналогично выводится ВСПМ сигналов двух ДПЗ, расположенных в точках r_1, r_2 :

$$G_{r_1 r_2}(\omega, r_1, r_2) = W_p(\omega) + A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln \Phi(r_1)] [\ln \Phi(r_2)] \quad (7.10)$$

По АСПМ и ВСПМ несложно выписать выражение для функции когерентности двух сигналов ДПЗ:

$$\begin{aligned} \Gamma_{r_1 r_2}(\omega, r_1, r_2) &= \frac{|G_{r_1 r_2}(\omega, r_1, r_2)|^2}{G_{r_1}(\omega, r_1) G_{r_2}(\omega, r_2)} = \\ &= \frac{\left\{ W_p(\omega) + A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln \Phi(r_1)] [\ln \Phi(r_2)] \right\}^2}{\left\{ W_p(\omega) + A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln^2 \Phi(r_1)] \right\}} \times \\ &\times 1 / \left\{ W_p(\omega) + A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln^2 \Phi(r_2)] \right\} \end{aligned} \quad (7.11)$$

7.6.2 Соседние и удаленные ДПЗ

В сигналах двух ДПЗ, установленных в соседних ТВС, всегда доминирует глобальный (реактивный) компонент $W_p(\omega)$. На рис. 7.13 изображены функции когерентности, убывающие в НЧ диапазоне от значения порядка 0,9 до практически нулевого при увеличении расстояния между двумя ДПЗ.

Это свойство позволяет разложить выражение для функции когерентности сигналов соседних ДПЗ до линейного члена:

$$\begin{aligned} \Gamma_{r_1 r_2}(\omega, r_1, r_2) &= \frac{\left\{ 1 + \frac{A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln \Phi(r_1)] [\ln \Phi(r_2)]}{W_p(\omega)} \right\}^2}{\left\{ 1 + \frac{A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln^2 \Phi(r_1)]}{W_p(\omega)} \right\}} \times \\ &\times 1 / \left\{ 1 + \frac{A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln^2 \Phi(r_2)]}{W_p(\omega)} \right\} \end{aligned}$$

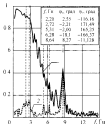


Рис. 7.13. Когерентности для пар ДПЗ, расположенных в соседних (02—35 и 03—36) и удаленных (02—35 и 14—23) ТВС (кривые 1 и 2 соответственно) и значения фаз на резонансных частотах

$$\left\{ 1 + 2 \frac{A^2 \lambda^3 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln \Phi(r)] [\ln \Phi(r_2)]}{W_p(\omega)} \right\} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln \Phi(r)]^2}{W_p(\omega)} \right\} \left\{ 1 - \frac{A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln \Phi(r_2)]^2}{W_p(\omega)} \right\}$$

Пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, имеем

$$\Gamma_{112}(\omega, r, r) \approx 1 - \frac{A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0)}{W_p(\omega)} \left[\ln \frac{\Phi(r)}{\Phi(r_2)} \right]^2 \quad (7.12)$$

Таким образом, для соседних ДПЗ, чем больше амплитуда коллективных вибраций ТВС и чем больше отличаются друг от друга градиенты нейтронного поля в местах установки ДПЗ, тем меньше когерентность. При совпадении статистических нейтронных потоков $\Phi(r_1)/\Phi(r_1) = \Phi(r_2)/\Phi(r_2)$ функция когерентности становится равной единице, и эффект от вибраций из нее выделить невозможно.

На характерных частотах, где наблюдаются коллективные выб

рации ТВС, когерентность сигналов удаленных ДПЗ не велика, а фаза близка к π . На рис. 7.13 такая когерентность на частоте 2,71 Гц составляет 0,17 при фазе 171° (см. табл. на рис. 7.13). Это возможно, когда глобальный компонент пренебрежим по сравнению с локальным, т.е. можно считать, что $W_p(\omega) = 0$. Тогда ВСПМ определится только эффектом коллективных вибраций

$$G_{r_1 r_2}(\omega; r_1, r_2) = A^2 \lambda^2 \delta^2(\omega - \omega_0) [\ln \Phi(r_1)] [\ln \Phi(r_2)]$$

В каждом из двух рассматриваемых АСПМ по-прежнему доминирует свой глобальный член, и они, вообще говоря, отличны друг от друга. После несложных выкладок получаем, что когерентность в отличие от предыдущего случая, тем больше, чем больше амплитуда вибраций и соответствующие градиенты нейтронного поля

$$\Gamma_{r_1 r_2}(\omega; r_1, r_2) = \frac{A^4 \lambda^4 \delta^4(\omega - \omega_0) [\ln \Phi(r_1)]^2 [\ln \Phi(r_2)]^2}{W_p(\omega) W_p(\omega)} \quad (7.13)$$

Таким образом, в функции когерентности сигналов двух ДПЗ эффект коллективных вибраций ТВС может проявляться как в виде резонанса (для удаленных ДПЗ), так и в виде локального минимума в точности на той же частоте (для соседних ДПЗ). Это далеко не очевидный результат: исследователи нейтронных шумов связывают с вибрациями, как правило, только резонансы различных спектральных характеристик, но никак не локальные минимумы. Данный вывод, полученный в результате допущений о свойствах глобального компонента, подтверждается экспериментально. На рис. 7.13 на частоте 2,71 Гц имеем резонанс 0,17 для удаленных ДПЗ и локальный минимум 0,90 для соседних ДПЗ

7.4.3. Метод трех ДПЗ для компенсации глобального компонента нейтронного шума на частоте вибраций ТВС

На низших частотах АСПМ сигнала ДПЗ имеет настолько большой глобальный компонент, что на этом фоне резонансы, вызванные вибрациями ВКУ, практически незаметны (рис. 7.14).

Для контроля параметров вибрации (например, частоты и амплитуды) необходимо найти способ компенсации глобального ком-

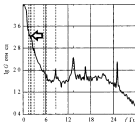


Рис. 7.14 АСПМ сигнала ДПЗ

понента. В этом качестве могут применяться полученные выше функции когерентности сигналов двух ДПЗ:

$$A = \begin{cases} C_1 \sqrt{1 - \Gamma_{12}(f_i)} & \text{— для соседних ТВС} \\ C_2 \sqrt[4]{\Gamma_{12}(f_i)} & \text{— для удаленных ТВС} \end{cases} \quad (7.14)$$

где C_1, C_2 — константы.

Можно сконструировать другие эффективные диагностические признаки коллективных вибраций ТВС. Например, локальный вибрационный компонент удобно характеризовать следующей безразмерной нормированной на глобальный компонент функцией

$$\Delta(f) = \frac{G(f)}{W_0} - 1 \quad (7.15)$$

Как следует из выражения для АСПМ (7.9), в нем скомпенсирован глобальный компонент и она зависит от амплитуды вибраций ТВС

$$\Delta(f) = \frac{A^2}{W_0} (\ln \Phi)$$

Чтобы найти зависимость функции $\Delta(f)$ от полученных выше функций когерентности, выберем три ДПЗ так, чтобы для ДПЗ

рис. 7.15 Когерентности для метода трех ДПЗ

$$\begin{aligned}\Gamma_{12}(\omega) &= 1 - \frac{A^2 \lambda^2 B^2(\omega - \omega_0) [\ln(\Phi_1 + \Phi_2)]^2}{B^2(\omega)} \\ \Gamma_{13}(\omega) &= 1 - \frac{A^2 \lambda^2 B^2(\omega - \omega_0) [\ln(\Phi_1)]^2 (\ln \Phi_2)^2}{B^2(\omega) B_2(\omega)} \\ \Gamma_{23}(\omega) &= 1 - \frac{A^2 \lambda^2 B^2(\omega - \omega_0) [\ln(\Phi_2)]^2 (\ln \Phi_1)}{B^2(\omega) B_2(\omega)}\end{aligned}$$



были соседними, а третий по отношению к ним был удаленным ДПЗ (рис. 7.15).

Каждая из трех выбранных точек характеризуется своей парой неизвестных функций $B(\omega)$, $\Phi(r)$, за исключением 1-й и 2-й точек, в которых действует один и тот же глобальный компонент. Таким образом, имеем пять неизвестных функций и только три оценки функции когерентности.

С помощью формул, приведенных на рис. 7.15 несложно проверить справедливость следующих уравнений:

$$\begin{cases} \Delta_1(f)/\Delta_2(f) = \Gamma_{13}(f)/\Gamma_{23}(f) \\ \sqrt{\Delta_1(f)} - \sqrt{\Delta_2(f)} = \sqrt{1 - \Gamma_{12}(f)} \\ \Delta_1(f)\Delta_3(f) = \Gamma_{13}(f) \end{cases} \quad (7.16)$$

откуда получим некие функции

$$\begin{cases} \Delta_1 = \frac{\Gamma_{13}(1 - \Gamma_{12})}{(\sqrt{\Gamma_{13}} - \sqrt{\Gamma_{23}})^2} \\ \Delta_2 = \frac{\Gamma_{23}(1 - \Gamma_{12})}{(\sqrt{\Gamma_{13}} - \sqrt{\Gamma_{23}})^2} \\ \Delta_3 = \frac{(\sqrt{\Gamma_{13}} - \sqrt{\Gamma_{23}})^2}{(1 - \Gamma_{12})} \end{cases} \quad (7.17)$$

Из определения функции $\Delta(f)$ (7.15) несложно получить формулу глобального компонента:

$$W_g = \frac{G(f)}{\Delta(f)+1}$$

Данный метод работает, если на частотах коллективных вибраций ТВС выполнены следующие условия: $G_1 \neq G_2$, $\Gamma_{12} \neq 1$, $\Gamma_{13} \neq \Gamma_{23}$. Таким образом, сигналы трех ДПЗ позволяют в нормированном виде отделить глобальный маскирующий нейтронный шум от локального компонента вибраций ТВС.

7.7 Модель внутреннего нейтронного шума, возникающего при колебаниях шахты

Эффект пространственного изменения границы активной зоны при колебаниях шахты авторы работ [15–17] считают одним из основных источников внутризонного нейтронного шума.

Для аналитического доказательства они представили границу активной зоны в полярных координатах в виде суммы статистического радиуса R_0 и некоей, вообще говоря, случайной функции координат $\varepsilon(\varphi, t)$ (в данном случае только одного угла)

$$R(\varphi, t) = R_0 + \varepsilon(\varphi, t) \quad (7.18)$$

Случайная функция $\varepsilon(\varphi, t)$ — флуктуация границы активной зоны вокруг R_0 — представлялась в виде двух групп слагаемых:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\varphi, t) = & \varepsilon_1(\varphi, t) + \varepsilon_2(\varphi, t) = a_1(t) \cos \varphi + b_1(t) \sin \varphi + \\ & + a_2(t) \cos 2\varphi + b_2(t) \sin 2\varphi \end{aligned} \quad (7.19)$$

соответствующих разложению в тригонометрический ряд до второй гармоники включительно. Первая гармоника (первые два слагаемых в (7.19)) соответствует балочным колебаниям активной зоны, вторая — оболочечным колебаниям.

Нулевой член разложения, соответствующий невозмущенному состоянию активной зоны (т.е. с постоянной границей радиуса R_0) по определению равен нулю, а высшие моды колебаний, соответствующие гармоникам третьей и выше пренебрегались.

вследствие малости их амплитуд. Коэффициенты разложения — случайные функции $a(t)$, $b(t)$ (функции только времени) — могут быть определены, если задаться траекторией движения шахты. Если $a(t)$, $b(t)$ — константы, то задается однонаправленное детерминированное балочное движение (рис. 7.16). Однако, как показали многочисленные экспериментальные исследования, балочные колебания практически никогда не являются строго однонаправленными. Чаще всего усредненная во времени траектория близка к эллипсу, а мгновенная — содержит мощный стохастический компонент. Поэтому целесообразно задавать функции $a(t)$, $b(t)$ в виде случайных процессов с разными дисперсиями, чтобы получился эллипс не окружность.

Оболочечные колебания всегда происходят во взаимно перпендикулярных направлениях и очень близки к детерминированному движению. Поэтому соответствующие слагаемые в выражении (7.19) можно свернуть к виду

$$e_2(\varphi, t) = e_2(t) \cos 2(\varphi - \chi) \quad (7.20)$$

После такого представления границ активной зоны, авторы специально разработанными приемами решали уравнение диффузии в одногрупповом приближении. Авторы получили, что в цилиндрических координатах в частотной области флуктуации внутри зонного нейтронного потока описываются уравнением

$$\partial \Phi(r, \varphi, \omega) / \partial t = \frac{\Phi_0(R_0)}{l} \left\{ H_1(R_0, r, \omega) \varphi_1(\varphi, \omega) + H_2(R_0, r, \omega) \varphi_2(\varphi, \omega) \right\} \quad (7.21)$$

где $\Phi_0(R_0)$ — статический нейтронный поток на границе активной зоны; l — время жизни мгновенных нейтронов; $H_1(R_0, r, \omega)$ — передаточная функция (пространственно-частотный фильтр) по

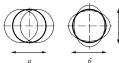


Рис. 7.16. Балочные однонаправленные (а) и оболочечные колебания шахты (б); для каждого случая показано равновесие и для экстремальных положений шахты

рожденная базовыми колебаниями активной зоны; $H_j(R_0, r, \omega)$ — передаточная функция, порожденная оболочечными колебаниями активной зоны.

Для дальнейших выкладок существенно, что обе передаточные функции содержат только радиальный компонент пространственных координат и не содержат угловой координаты.

В явном виде передаточные функции записываются через функции Бесселя и баклинг $B(\omega)$ следующим образом:

$$H_1(R_0, r, \omega) = \frac{J_1[B(\omega)r]}{iB(\omega)J_1'[B(\omega)R_0] + J_1[B(\omega)R_0]} \quad (7.22)$$

$$H_2(R_0, r, \omega) = \frac{J_2[B(\omega)r]}{iB(\omega)J_2'[B(\omega)R_0] + J_2[B(\omega)R_0]} \quad (7.23)$$

Отсюда следует, что в центре активной зоны ($r = 0$) составляющие нейтронного шума, которые возникали из-за колебаний шахты, отсутствуют. На усредненной границе (R_0), напротив, НШ принимает максимальное значение:

$$H_1(R_0, r, \omega) = \left\{ 1 + iB(\omega) \ln \left[J_1[B(\omega)R_0] \right] \right\} \quad (7.24)$$

Частотная зависимость этих передаточных функций не очень важна, так как диапазоны частот, в которых наблюдаются колебания шахты, довольно узки по сравнению с исследуемым диапазоном частот, а разные типы колебаний шахты (в данном случае рассматриваются только два типа) сосредоточены в разных диапазонах частот.

Вычисляя квадрат модуля от выражения для внутризонного нейтронного шума (7.21), производя усреднение по случайным компонентам данного уравнения и учитывая, что рассматриваемые типы колебаний не коррелируют друг с другом, получим следующее выражение для АСПМ:

$$G_{\text{вз}}(r, \varphi, \omega) = \left(\frac{\Phi_0(R_0)}{l} \right)^2 \left\{ \left[H_1(R_0, r, \omega) \right]^2 G_c(\varphi, \omega) + \right. \\ \left. + \left[H_2(R_0, r, \omega) \right]^2 G_c(\varphi, \omega) \right\} \quad (7.25)$$

Таким образом, АСПМ внутризонного нейтронного шума является взвешенной суммой АСПМ флуктуаций на границе активной зоны. Причем, взвешивание производится пространственно зависимыми фильтрами, имеющими на границе активной зоны (именно там рождаются возмущения) максимальное значение, которое по мере уменьшения радиуса снижается и в центре активной зоны становится нулевым.

В диапазоне частот, где доминируют балочные колебания второслагаемое формулы (7.25) пренебрежимо мало

$$G_{\text{вв.1}}(r, \varphi, \omega) = \left(\frac{\Phi_0(R_1)}{l} \right)^2 \left[H_1(R_1, r, \omega) \right]^2 G_e(\varphi, \omega) \quad (7.26)$$

Таким образом, для балочных колебаний если нет дополнительных сведений о характере траектории, а есть только общая формула (7.19) можно предположить, что азимутальная зависимость мощности внутризонного нейтронного шума при обходе полного круга имеет два максимума (и соответственно, два минимума). При движении шахты точно по круговой траектории азимутальная зависимость вырождается в константу, при движении по эллипсу с мало отличающимися по величине осями — очень слаба.

В диапазоне частот, где доминируют оболочечные колебания формула (7.25) еще более упрощается

$$G_{\text{об.2}}(r, \varphi, \omega) = \left(\frac{\Phi_0(R_0)}{l} \right)^2 \left[H_2(R_0, r, \omega) \right]^2 G_e(\varphi, \omega) = \\ F(r, \omega) [1 + \cos 4(\varphi - \chi)] \quad (7.27)$$

Последнее выражение позволяет совершенно определенно утверждать, что азимутальная зависимость мощности внутризонного нейтронного шума имеет четыре максимума, которые расположены на двух главных осях оболочечных колебаний. Учитывая что внутризонных нейтронных датчиков как правило много больше чем внезонных датчиков, получаем, что зависимость (7.27) дает возможность экспериментально определять направление главных осей оболочечных колебаний

Для каждого типа колебания шахты фазовые соотношения между сигналами двух внутризонных датчиков (например, ДПЗ) такие же, как и для двух внезонных датчиков (например, ионизационных камер). При балочных колебаниях датчики расположены противоположно по отношению к центру активной зоны, дают противофазу, а при оболочечных — синфазные сигналы. В точности такие же соотношения для рассматриваемых типов колебаний шахты будут и у противоположно расположенных ионизационных камер. Фазовые соотношения между сигналами вне- и внутризонных датчиков до конца еще не поняты, но, предположительно, их сигналы противофазны вследствие наличия отражателя в виде слоя воды, изменяющего свою толщину при колебаниях шахты.

7.8. Сравнение диагностических возможностей вне- и внутризонного нейтронно-шумовых каналов

Если подтвердятся гипотезы, изложенные в предыдущем разделе, то резко возрастет роль внутризонных шумовых измерений в ущерб шумовым измерениям сигналов ионизационных камер. Действительно, как показано выше, внутризонные нейтронные датчики, расположенные на периферии активной зоны, по своим амплитудным и фазовым соотношениям дают практически те же характеристики, что и внезонные нейтронные датчики. Это подтверждается и экспериментом: АСПМ ИК и АСПМ периферийного ДПЗ на рис. 7.17, полученном на блоке III БалАЭС, практически не отличаются друг от друга.

В этом смысле выгодно отличаются реакторы типа ВВЭР-1000 от подобных иностранных реакторов типа PWR. Реакторы ВВЭР-1000 обладают самым большим объемом внутризонных нейтронных измерений (448 ДПЗ, расположенные по 7 штук в 64 КНИ) и эти измерения решены на стационарной основе, в отличие от малого числа передвижных гирлянд нейтронных датчиков в некоторых иностранных проектах реакторов.

В существующей практике виброшумовой диагностики обычно никогда не противопоставляли внезонный измерительный канал внутризонному именно потому, что внезонный канал имел монополию диагностирования вибраций шахты активной зоны

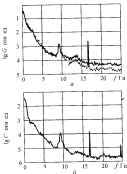


Рис. 7.17. АСПМ флуктуации ИК (а) и АСПМ флуктуации периферийного напряжения (7-го) ДПЗ (б), блок III БилАЭС

Теперь, с точки зрения нейтронно-шумовых диагностических возможностей, у внутризонных нейтронных детекторов есть преимущества перед ионизационными камерами:

- внутризонные детекторы могут оказаться более чувствительными к колебаниям шахты вследствие, возможно, лучшего соотношения сигнал/шум, так как ИК интегрируют довольно большие объемы нейтронного поля, в которых может доминировать паразитный коррелированный шум;

- они более чувствительны к вибрациям ТВС;

- они позволяют различать тонкую структуру распределения акустического поля внутри активной зоны;

- они чувствительны к локальным теплогидравлическим источникам нейтронного шума в ТВС, с помощью которых производятся шумовые измерения скорости ТН и обнаруживаются ранние стадии кипения ТН

- они дешевле ИК и технологичнее их

шумовые измерения сигналов штатных ИК обычно требуют дополнительных организационно-технических мероприятий. В частности, в целях продления срока службы высокочувствительных ИК их выводит из измерительного канала, а для измерения шумов опять вводят на некоторое время. ДПЗ всегда находится в активной зоне.

Благодаря большому количеству внутризонных нейтронных датчиков в объеме активной зоны появляются следующие возможности:

- экспериментальным путем точно определять направления главных осей оболочечных колебаний шахты;

- выбирать наименее зашумленные пары этих датчиков;

- определять высотные распределения интенсивности колебаний, так как внутризонные датчики обычно монтируются в виде гирлянд, расположенных в каналах ТВС.

К недостаткам внутризонных нейтронно шумовых каналов ДПЗ следует отнести:

- зависимость результатов измерений от чувствительности датчика, которая монотонно уменьшается в течение одного топливного цикла (за одну кампанию);

- изменение частотных свойств ДПЗ (появление неустойчивой высокочастотной области) при использовании его в течение нескольких топливных циклов;

- низкоуровневые сигналы, требующие специально построенной помехозащищенной электронной аппаратуры.

Основное преимущество внезонных шумовых измерений состоит в абсолютности измерений средних перемещений шахты в соответствии с формулой (7.1)

7.9 Теплогидравлические источники нейтронного шума, маскирующие вибрационные эффекты

7.9.1 Происхождение link структур

Внутризонная диагностическая информация, извлекаемая из нейтронного шума, базируется на двух типах источников: вибрационных и теплогидравлических. Некоторые СВШД, например система CARD, позволяют извлекать и тот, и другой типы источников нейтронного шума. Зачастую они находятся в одном и том

же диапазоне частот. Поэтому при решении вибрационных задач гидродинамические источники выступают как конкурентные маскирующие эффекты, и наоборот. Необходимо знать особенности каждого типа источников, чтобы отделить эти эффекты друг от друга.

Чаще всего вибрационные эффекты проявляются в виде дискретных линий спектральных характеристик, а гидродинамические источники континуальны, т.е. непрерывны по частоте, занимают протяженные диапазоны частот, в которых наблюдается некая периодическая структура (так называемая *pink* структура).

Гидродинамические источники нейтронного шума исследовались в рамках нейтронно-гидродинамических шумовых моделей. Это большое количество и аналитических, и конечно-разностных численных моделей, которые бурно развивались последние двадцать лет. Рассмотрим кратко одну из таких моделей, результаты которой приложимы непосредственно к нейтронно-шумовым измерениям на ВВЭР [18–20]. В ней нейтронно-температурная модель с аксиальной пространственной зависимостью поля энерговыделения $F(z)$ состоит из температурных балансов в системе «топливо-теплоноситель» и уравнений нейтронной кинетики с обратной связью по мощности через температурный коэффициент реактивности (ТКР).

В графическом виде упрощенная и линеаризованная нейтронно-температурная модель, записанная в вариациях в частотной области, представлена на рис. 7.18.

Передаточные функции $W_{T_c T_n}$, $W_{T_c Q}$ (см. рис. 7.18), получаемые из нейтронных и температурных балансов, играют роль пространственно зависимых фильтров при точечных входных источниках $\delta T_n(\omega)$, $\delta Q(\omega)$, тем самым обуславливая пространственную зависимость температурных флуктуаций ТН $\delta T_c(\omega, z)$.

Если считать, что флуктуации сигнала ионизационной камеры совпадают с флуктуациями нейтронной мощности $\delta N(\omega)$, флуктуации сигнала ДПЗ состоят из двух слагаемых: глобального $\delta N(\omega)$ и локального $b \cdot \delta T_c(\omega, z)$ нейтронного шума, $\delta i(\omega, z) = \delta N(\omega) + b \cdot \delta T_c(\omega, z)$, b — эффективность ДПЗ по отношению к регистрации температурных флуктуаций, то глобальный и локальный компоненты нейтронного шума ВВЭР коррелируют. Действитель-



Рис. 7.18. Упрощенная схема шумовой динамики активной зоны ВВЭР

$\delta T_{\nu}(\omega)$, $\delta Q(\omega)$ — входные источники флуктуаций температуры и расхода ТН на входе в АзЗ соответственно; $\delta T_{\nu}(\omega, z)$ — флуктуации сигнала первичного; $\delta r(\omega)$ — флуктуации реактивности; $\delta \beta(\omega)$ — флуктуация замедлителя; $U_{\nu}(\omega)$ — передаточная функция от реактивности к нейтронному потоку; $\alpha_c = \text{TRP}$; $\delta T_{\nu}(\omega) = \langle \delta T_{\nu}(\omega, z); 0 \rangle$ — флуктуация средней по АзЗ температуры ТН; $\langle \dots \rangle$ — оператор усреднения по z ; ΔT — перепад температуры ТН на АзЗ; $\delta T_{\nu}(\omega, z)$ — флуктуации сигнала ДПЗ

но, они оба зависят от двух точечных источников $\delta T_{\nu}(\omega)$, $\delta Q(\omega)$, в результате чего существует аналитическая связь между G - L -компонентами:

$$\delta N(\omega) = \alpha_c \Delta T U_{\nu}(\omega) \langle \delta T_{\nu}(\omega, z) \rangle. \quad (7.26)$$

Иными словами, G -компонент с точностью до константы есть усредненный по объему АзЗ и профильтрованный передаточной функцией «реактивность-нейтронная мощность» L -компонент. Оба источника $\delta T_{\nu}(\omega)$, $\delta Q(\omega)$ транспортируются по каналу, т. е. эффекты запаздывания неизбежно наблюдаются в G - L (ИК—ДПЗ) и L_1 - L_2 (ДПЗ—ДПЗ) — корреляциях.

Из феноменологической теории глобальности-локальности нейтронного шума (G - L -теория) реакторов с кипящей водой (BWR) в нейтронно-шумовую теорию реакторов с водой под давлением (PWR) ошибочно были применены следующие стереотипы:

- 1) глобальный и локальный компоненты не коррелируют, так как они чистоотно раздельны;
- 2) глобальный компонент описывается уравнениями точечной нейтронной кинетики, а локальный компонент определяется нейтронно-физическими процессами в непосредственной близости от нейтронного датчика.

Действительно, для BWR внутризонный нейтронный шум в ВЧ-диапазоне определяется в основном флуктуациями объема паровой фазы $\delta\alpha$ в области «видимости» внутризонного нейтронного детектора $[-L/2, L/2]$. По двум аксиально расположенным внутризонным нейтронным датчикам выделяется транспорт $\delta\alpha$, т.е. наблюдается линейная фаза ВСПМ $\delta\alpha \cdot \exp(-j\omega\tau_0)$, где τ_0 — время прохода паровой фазой расстояния между двумя детекторами. Сигналы двух удаленных нейтронных датчиков, установленных в разных каналах, в ВЧ-диапазоне не коррелируют, а в НЧ-диапазоне подчиняются точечной кинетике, т.е. синфазны. Эти экспериментальные факты легли в основу G — L -теории BWR, т.е. доказали справедливость постулатов 1 и 2. Флуктуации $\delta\alpha$ с точностью до константы отождествлялись с L -компонентом, а флуктуации δN — решение уравнений точечной нейтронной кинетики — с G -компонентом.

7.9.2 Sink-структуры, обусловленные глобальным компонентом нейтронного шума

Наличие взаимосвязи между сигналом ДПЗ $\delta I(\omega, z) = \delta N(\omega) + a + b \cdot \delta T_C(\omega, z)$ и сигналом ИК $\delta N(\omega)$ искажает эффекты запаздывания между сигналами ДПЗ—ДПЗ и ДПЗ—ИК. Даже существование интервала частот, в котором фаза ВСПМ представляет линейную функцию, не является достаточным условием для того чтобы непосредственно оценивать скорость ТН по времени запаздывания. Это правомочно только для «чистого транспорта», т.е. только тогда, когда ВСПМ представляет функцию вида $G(f) = \cos \pi f \tau_0 \cdot \exp(-j2\pi f \tau_0)$. Уже для выражения $G(f) = a + b \cdot \exp(-j2\pi f \tau_0)$ слагаемое a сдвигает фазовую характеристику. Существуют, по крайней мере, два случая ($a = \pm 1$), когда фаза будет по-прежнему, строго линейной, но с наклоном соответствующим половинному времени τ_0 . При $a = 1$ имеем

$$\begin{aligned} G(f) &= 1 + \exp(-j2\pi f \tau_0) = \\ &= \exp(-j\pi f \tau_0) [\exp(j\pi f \tau_0) + \exp(-j\pi f \tau_0)] = \\ &= 2 \cos \pi f \tau_0 \exp(-j\pi f \tau_0) \end{aligned} \quad (7.29)$$



Рис. 7.19. Линейные фазы ВСПМ при $a = 0$ (пунктирная кривая), $a = 1$ (сплошная кривая) $a = -1$ (пунктирная кривая)



Аналогично при $a < -1$

$$\begin{aligned} G(f) &= 1 + \exp(-j2\pi f\tau_0) \\ &\exp(-j\pi f\tau) [\exp(j\pi f\tau_0) - \exp(-j\pi f\tau_0)] \\ &2 \sin \pi f\tau_0 \exp(-j\pi f\tau_0) \end{aligned} \quad (7.30)$$

Таким образом, добавление к «чистому» транспорту слагаемого, по модулю равного единице, приводит к *sink*-структурам в модуле ВСПМ $|G(f)|$ и вдвое уменьшает наклон линейной фазы, что дает стопроцентную погрешность ошибку оценки τ_0 (рис. 7.19)

При произвольном a фазовая характеристика

$$\varphi(f) = \arctg \frac{\sin 2\pi f\tau_0}{a + \cos 2\pi f\tau_0}$$

может значительно уклоняться от прямой линии. Но если все таки линейная аппроксимация возможна, то при $a > 1$ оценка τ_0 будет всегда занижена и соответственно скорость — всегда завышена.

Параметр a можно понимать, как квадрат амплитуды коррелированного зашумления. Иными словами, транспорт флуктуации (например, температурных) на фоне глобального шума (например, нейтронного) и есть одна из причин появления *sink* структур в модуле ВСПМ

7.9.3 Sink-структуры, возникающие вследствие усреднения по пространственным координатам

Интегрирование «чистого» транспорта в пространственных координатах также приводит к sink-структурам

$$\frac{1}{H} \int_0^L \exp\left(-j\omega\tau_0 \frac{\xi}{H}\right) d\xi = \exp\left(-j\omega \frac{\tau_0 L}{2H}\right) \left(\frac{\sin \frac{\omega\tau_0 L}{2H}}{\frac{\omega\tau_0}{2}} \right) \quad (7.31)$$

Такая операция встречается при получении передаточной функции $W_{T_C Q}(\omega, z)$ (см. рис. 7.18). Иными словами, процессы теплообмена в активной зоне, в результате которых флуктуации расхода преобразуются во флуктуации температуры теплоносителя в канале, имеют sink-структуру.

Наличие пространственно зависящего сомножителя $F(z)$ при интегрировании «чистого» транспорта

$$\frac{1}{H} \int_0^L F(\xi) \exp\left(-j\omega\tau_0 \frac{\xi}{H}\right) d\xi \quad (7.32)$$

дает свой ряд sink-структур, который зависит от свойств функции $F(z)$, а значит, несет информацию о $F(z)$ — форм-факторе характеризующем пространственное (аксиальное) распределение мощности с нормирующим свойством

$$\frac{1}{H} \int_0^L F(z) dz = 1$$

Интегрирование «чистого» транспорта с пространственным весом свойственно и операции усреднения $(\delta T_C(\omega, z))_z$ при переходе от флуктуаций температуры ТН к флуктуациям реактивности через ТКР.

Ширина первого лепестка sink-структуры, которую далее будем называть апертурой sink-структуры — важный параметр для практических исследований. Если интегрирование (7.31) проводится в малых пространственных пределах (много меньших чем высо-

та активной зоны), то апертурой получаются очень широкими и такими λ nk-структурами можно пренебречь. Покажем это на примере. До сих пор ДПЗ выступал как точечный датчик, т.е. ток ДПЗ в точке z считался зависящим от температурных флуктуаций ТН только в точке z . Однако, очевидно, что ДПЗ имеет некоторую «область видности». Пусть это будет область

$$\left[-\frac{L}{2}, z \approx \frac{L}{2} \right]$$

где L — расстояние между ДПЗ. Тогда локальный компонент флуктуаций тока ДПЗ запишется в виде

$$\delta i(\omega, z) = \frac{1}{L} \int_{z-L/2}^{z+L/2} \delta T_L(\omega, \xi) d\xi \quad (7.32)$$

Предположим для простоты, что флуктуации температуры ТН представляют собой «чистый» транспорт входных флуктуаций температуры ТН, т.е.:

$$\delta T_L(\omega, z) = \delta T_{in}(\omega) \exp\left(-i\omega \tau_0 \frac{z}{H}\right) \quad (7.34)$$

Подставляя последнее выражение в формулу (7.32) и интегрируя, получаем

$$\delta i(\omega, z) = \delta T_{in}(\omega) \exp\left(-i\omega \tau_0 \frac{z}{H}\right) \frac{\sin \frac{\omega \tau_0 L}{H}}{\frac{\omega \tau_0 L}{H}} \quad (7.35)$$

Таким образом, получилась λ nk-структура с очень широкой апертурой, которой можно пренебречь. Действительно, частота первого нуля для выражения (7.35) равна $F_{0\text{нк}} = H/(L\tau_0)$, а «область видности» ДПЗ L составляет величину порядка нескольких сантиметров. Итак, первый ноль у λ nk-структуры, полученной при детекторном усреднении, будет находиться на частоте, исчисляемой десятками герц.

7.9.4. Силк структуры, обуславливаемые аксиальной неравномерностью поля излучения

Реальное распределение интенсивности нейтронного потока по высоте не является равномерным, т.е. $F(\xi_z) \neq \text{const}$, а ее первая пространственная гармоника с точностью до константы имеет вид $\sin(\pi \xi_z/H)$. Функция $F(\xi_z)$ входит в локальный компонент нейтронного шума в виде

$$\frac{1}{H} \int_0^H F(\xi_z) \exp\left(-j\omega \tau_0 \frac{\xi_z}{H}\right) d\xi_z$$

а в глобальный — в виде

$$\frac{1}{H} \int_0^H F(\xi_z) \exp\left(-j\omega \tau_0 \frac{\xi_z}{H}\right) d\xi_z$$

При $F(\xi_z) = \sin(\pi \xi_z/H)$ выражение для аксиального распределения локального компонента примет вид

$$P(\omega) = \frac{1}{H} \int_0^H \sin \pi \frac{\xi_z}{H} \exp\left(-j\omega \tau_0 \frac{\xi_z}{H}\right) d\xi_z \cdot \left(\frac{j}{\pi} \exp\left[-(j\omega' \tau_0 z/H)\right] \right) \times \\ \times \left\{ \frac{\sin\left[\frac{\pi z}{2H}(1-2f\tau_0)\right]}{1-2f\tau_0} \exp\left(\frac{j\pi z}{2H}\right) - \frac{\sin\left[\frac{\pi z}{2H}(1+2f\tau_0)\right]}{1+2f\tau_0} \exp\left(-\frac{j\pi z}{2H}\right) \right\}$$

При $z=H$ получим

$$P_0 = \frac{1}{H} \int_0^H \sin \pi \frac{\xi_z}{H} \exp\left(-j\omega \tau_0 \frac{\xi_z}{H}\right) d\xi_z = \frac{2}{\pi} \cdot \exp(-j\pi f \tau_0) \frac{\cos \pi f \tau_0}{1-(2f\tau_0)^2}$$

Если сравнить со случаем $F(\xi_z) = 1$ когда

$$P = \frac{1}{H} \int_0^H \exp\left(-j\omega \tau_0 \frac{\xi_z}{H}\right) d\xi_z = \exp(-j\pi f \tau_0) \left(\frac{\sin \pi f \tau_0}{\pi f \tau_0} \right)$$

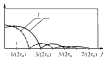


Рис. 7.20. Глобальная структура $\phi(\omega)$

1 — ϕ_1 ; 2 — ϕ_2

то видно, что линейная зависимость фазы от частоты не изменилась, а sink -частоты сдвинулись на величину $1/(2T_0)$ (рис. 7.20). Итак, число sink -структур значительно увеличивается вследствие наличия истинно — поля энерговыделения реактора.

Список литературы

1. Tille J.A. Theoretical considerations and their application to experimental data in the determination of reactor internal motion from stochastic signals // Ann. Nucl. Energy. 1975. Vol. 2. P. 253—259.
2. Robinson J.C., Sharohi F. Determination of core barrel motion from the neutron noise spectral density data-scale factor // Trans. Amer. Nucl. Soc. 1971. Vol. 23. P. 458—462.
3. Drugi J.B., Turkay E. Borssele PWR noise measurements, analysis and interpretation // Prog. Nucl. Energy. 1977. Vol. 1. P. 293—296.
4. Tille J.A. Core motion monitoring // Nucl. Technol. 1979. Vol. 48. N 1. P. 5—18.
5. Thompson J.P., McCoy G.R., Labin C.T. Experimental value of percent variation in root-mean-square ex-core detector signal to the core barrel amplitude scale factor // Ibid. 1980. Vol. 48. P. 122—127.
6. Wehling H.-J., Klinger K., Stollen H. Vibration monitoring of KWU pressurized water reactor — review present status and further developments // Ibid. 1988. Vol. 88. P. 87—91.
7. Keady G. Noise investigation in BWR and PWR // Prog. Nucl. Energy. 1980. Vol. 5. P. 145—199.
8. Булашев В.В., Гусев Д.Ф., Павелко В.И. Исследования характеристик виброакустических ВВЭР-1000 в эксплуатационных условиях // Атомная энергия. 1993. Т. 79. Вып. 5. С. 343—349.
9. Bulashev V.V., Gusev D.F., Pavelko V.I. The experimental definition of the acoustic standing waves series shapes, formed in the coolant of the primary circuit of VVR-440 type reactor // Prog. Nucl. Energy. 1993. Vol. 29. N 3/4. P. 153—170.
10. Keady G., Wach D. Investigation in the joint effect of local and global

driving sources in in-core neutron noise measurement // *Atomic Energy* 1975. Bd 23. P. 244—248.

11. Kesaly G., Maske L. Theory of the auto-spectrum of the local components of PWR // *Ann. Nucl. Energy*. 1976. Vol. 3. P. 233—238.

12. Saito K. On the theory of power reactor noise (I, II, III) // *Ann. Nucl. Sci. Engng.* 1974. Vol. 1. P. 3—253.

13. Акимов Г.Г., Гущев Д.Ф., Павлов В.И. Физическая интерпретация нейтронно-шумовых образов ВВЭР // *Атомная энергия* 1987. Т. 82. Вып. 4. С. 271—277.

14. Yavrin J. Noise analysis of reactor core barrel impact oscillations // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI*. 19—24 May, 1991. Oaklindhurg, Tennessee, USA. Session 4 — Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures, Vol. 1. P. 16/91.

15. Parsit I., Karlsson J., Garis N. S. Some developments in core-barrel vibration diagnostics // *Ann. Nucl. Energy*. 1998. Vol. 25. P. 1079—1093.

16. Parsit I., Arzhanov V. Linear Reactor Kinetics In Systems with Fluctuating Boundaries // *Ibid.* 2000. Vol. 27. P. 1385—1398.

17. Arzhanov V., Parsit I. Diagnostics of Core Barrel vibrations by in-core and ex-core neutron noise (SMORN-VIII) // *Prog. Nucl. Energy*. 2003. Vol. 43. N 3—4. P. 151—158.

18. Павлов В.И. Нейтронно-температурные шумовые модели активной зоны ВВЭР // *Атомная энергия*. 1992. Т. 72. Вып. 6. С. 66—81.

19. Gatsen D.F., Pavlovka V.I. Neutron-temperature noise methods and their experimental check on the reactor VVER-1000 // *Specialists' meeting on in-core instrumentation and reactor core assessment INCORE-96*. 14—23 October, 1996. Mito, Japan.

20. Гущев Д.Ф., Павлов В.И. Шумовые методы диагностики ВВЭР // *Атомная энергия*. 1997. Т. 82. Вып. 4. С. 264—271.

Глава 8

Экспериментальные спектральные характеристики шумов ВВЭР-1000

8.1 Экспериментальные условия

Виброшумовые исследования ВВЭР-1000 в эксплуатационных условиях проводились на Калининской, Балаковской, Нововоронежской, Запорожской и Хмельницкой АЭС. Технические средства в этих шумовых измерениях чаще всего носили опытный характер, а детекторное оснащение состояло главным образом из штатных ИК, ДПЗ и ДПД (рис. 8.1). Таким образом, на первом этапе виброшумовых исследований ВВЭР-1000 доминировал нейтрально-шумовой анализ, поставляющий информацию о внутрикорпусных АСВ, вибрациях ВКУ и ТВС. Даже появление в 1991 г. на блоке I КлинАЭС пентерской СВШК CARD не изменило этого соотношения в пользу штатных датчиков ширинной частоты анбраций.

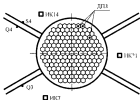


Рис. 8.1. Расположение конизированных камер (ИК2, ИК14, ИК31), ДПЗ и ДПД на головке (Q3, Q4) и горелки трубопровода (S4) в шумовых экспериментах на Блоке I КлинАЭС

Полная картина совместных колебаний всех основных элементов РУ (ПГ, ГЦН, трубопроводов, КР, ВКУ, ТВС) может быть получена только с переходом на качественно новый уровень технических средств СВШД [1, 2]. Прежде всего, это относится к числу измерительных каналов СВШД: необходим многоканальный (не менее 60 каналов) ПТК, регистрирующий шумовые сигналы ДАП, ДОП, ДЛД и шумовые компоненты сигналов ИК, ДЛЗ. На эту роль может претендовать СВШК SÜS-95 (блок III БалАЗС) после проведения ряда работ, упомянутых в гл. 2.

Ниже будут приведены характерные спектральные образы вибраций корпуса реактора, ВКУ, ТВС, а также вынуждающих вибраций сип для малой серии (на примере блока I КЛнАЗС) и большой серии (на примере блока III БалАЗС) ВВЭР-1000. После 1992 г. несколько крупномасштабных шумовых экспериментов выполнены на блоке I КЛнАЗС с помощью совместного использования СВШК CARD и мобильных ПТК разработки ЗАО «Дипром» [3–6]. После 1998 года подобные эксперименты стали проводиться и на блоке III БалАЗС на СВШК SÜS 95 и с помощью следующего поколения мобильных ПТК разработки ЗАО «Дипром» [7].

В первых экспериментах на КЛнАЗС [3] (см. рис. 8.1) по совокупности амплитудных, фазовых, гармонических и многомерных авторегрессионных признаков, полученных по сигналам ДЛЗ, ИК, ДЛД установлено следующее:

- на частоте около 2,6 Гц происходят коллективные вибрации ТВС с модой колебаний, соответствующей нижней моде колебаний стержня с двумя закрепленными концами;

- на частоте 7,6 Гц наблюдается вторая мода вибраций ТВС;

- частота коллективных вибраций ТВС сопровождается гармоническим рядом частот, что свидетельствует о нелинейном характере вибраций;

- для блока I КЛнАЗС в номинальных условиях, частоты приблизительно 0,6; 6,1; 8,6; 12,8; 14,5; 17,5 Гц являются низшими частотами АСВ движения и на них происходит вынужденные вибрации ВКУ (забегая вперед, отметим, что для серийных блоков ВВЭР-1000 частоты АСВ несколько различаются и составляют ряд 0,6; 6,5; 9,2; 13,2; 15,3; 20,1 Гц);

- частоты АСВ и частота вращения ГЦН сопровождаются субгар-

моническими рядами частот, что свидетельствует о соударениях ВКУ (соударения дистанционирующих решеток ТВС соударениями внутри шпоночных соединений шахты Ак3).

Эти результаты подтверждались после обработки экспериментов ХГО, проведенных в ходе ПНИ блока I Хмельницкой АЭС и блока I АЭС «Козлодуй».

8.2 Спектральные характеристики сигналов ИК и ДПД

Спектральные характеристики флуктуаций сигнала ИК ВВЭР-1000 отличаются малым числом резонансных особенностей. На рис. 8.2 представлена типичная АСПМ ИК, полученная по длительной реализации (порядка 30 мин). В диапазоне частот (1,8—3,0) Гц АСПМ ИК напоминает больше область плато, чем область, содержащую резонансы. Иными словами, эффекты коллективных пикировок ТВС «поглощены» глобальными эффектами. По этой же причине в АСПМ не выделяется резонанс компенсатора давления на частоте около 0,6 Гц. Практически не разрешается резонанс из диапазона (5,7—6,8) Гц, в котором доминирует 1-я петлевая АСВ. Она дает очень слабый нейтронно-шумовой эффект, так как данная АСВ имеет в корпусе реактора узел. Низкокаброботный, размытый по диапазону частот (7,8—10,8) Гц, резонанс соответствует 1-й корпусной АСВ, диапазон (12,1—13,4) Гц — 2-й корпусной АСВ. Последние две АСВ имеют в корпусе лучность. Здесь и далее принята упрощенная классификация низших мод АСВ: те АСВ, которые имеют лучность внутри корпуса реактора относятся к корпусным АСВ, те, которые имеют узел в корпусе реактора — к петлевым АСВ.

Все перечисленные спектральные особенности, хотя и не ярко выражены, тем не менее, являются статистически значимыми. На рис. 8.2 в трехмерном отображении даны АСПМ ИК, полученные с временным шагом в 1 ч. Они обладают высокой степенью воспроизводимости во времени (повторяемостью), что подтверждает высокий уровень стационарности наблюдаемых нейтронно-шумовых эффектов.

Функция когерентности между сигналами двух ИК в контрастном виде выделяет все спектральные особенности, перечисленные выше в АСПМ ИК (см. рис. 8.2). Помимо акустических резонансов (0,6; 6,1–8,6; 12,8 Гц) здесь от эксперимента к экспери

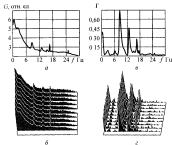


Рис. 3.2. Мгновенная АСПМ сигнала НК (а), АСПМ того же сигнала, регистрирующегося с периодичностью 1 м (б), мгновенная когерентность сигналов НК – НК (в), когерентность – полученная по периодическим измерениям (г)

менту с низкой когерентностью (не более 0,1) в диапазоне частот $(f_0, f_1) - (1,8-3,9)$ Гц в практическом отсутствии глобального фона наблюдается размытый резонанс, возникающий из-за вибраций ТВС. Это яркий пример того, что диагностически ценными бывают не обязательно высококогерентные процессы.

По функции когерентности и фазе выделяется диапазон частот (f_0, f_1) , где присутствует эффект коллективных вибраций ТВС и контроль их уровня производится по АСПМ и/или ВСПМ. В качестве диагностического признака может быть использован следующий интеграл

$$\int |VSPM(f)| df$$

Применять АСПМ в этом качестве неэффективно из-за большого фоновой pedestal, обусловленного глобальным нейтронным шумом.

Функция когерентности сигналов двух НК демонстрирует, что само понятие «глобальный нейтронный шум» для больших актив

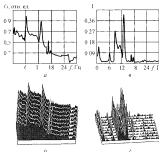


Рис. 8.3. Мгновенная АСПМ сигнала ДПД (а), АСПМ того же сигнала, регистрирующегося с периодичностью 1 ч (б), мгновенная когерентность сигналов ИК–ДПД (в), когерентность, полученная по периодическим измерениям (г)

ных зон некорректно. Сигналы двух ИК, находящиеся под углом $2\pi/3$ практически не коррелируют, т. е. $W_c(\omega) = 0$ в диапазоне частот между резонансами двух АСВ: 0,6 Гц (АСВ КД) и 8,6 Гц (АСВ_{IK}), где в каждом из сигналов ИК доминирует свой глобальный нейтронный шум. Иными словами, глобальный нейтронный шум имеет некую пространственную протяженность с характерным размером, много меньшим, чем диаметр активной зоны.

Прямым доказательством того, что все основные резонансы в спектральных характеристиках сигналов ИК порождены акустическими эффектами, является функция когерентности сигналов ДПД и ИК (рис. 8.3). Она даже по форме близка к функции когерентности сигналов двух ИК, не говоря уже о том, что у этих двух функций частоты самых мощных резонансов совпадают.

Спектральные характеристики сигналов ИК воспроизводимы не только во времени, как это продемонстрировано по сигналам блока I КЛнАЭС (см. рис. 8.2), но и по различным блокам АЭС (рис. 8.4). На блоке III БалАЭС примерно такие же спектральные

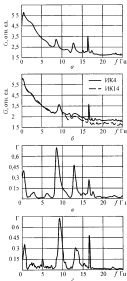


Рис. 8.4. АСПМ ИР на блоке I КЛнАЭС (а) и семейство АСПМ ИР на блоке III БМАЭС (б), функция когерентности ИР–ИР на блоке I КЛнАЭС (в) и на блоке III БМАЭС (г)

портреты сигналов ИР, что и на блоке I КЛнАЭС. Небольшое отличие в частотах акустических стоячих волн объясняется различной геометрией ГЦК этих двух проектов, а небольшие отличия в

НЧ-диапазоне объясняются различным местоположением пар ИК (ИК7-ИК21 -блок I КлинАЭС ИК4-ИК14 -блок III БалАЭС).

В экспериментах на блоке I КлинАЭС использовались ДПД и ИК находящиеся на значительном удалении друг от друга. ДПД установлен на холодной нитке третьей петли на расстоянии 26,5 м от корпуса реактора, а ИК находится между первой и четвертой петлями.

В НЧ-диапазоне АСПМ ДПД (рис. 8.3) значительно отличается от АСПМ ИК (см. рис. 8.2): максимальная амплитуда в АСПМ ДПД достигается на частоте 1-й петлевой АСВ 6,1 Гц (в АСПМ ИК она практически не обнаруживается), 1-я корпусная АСВ в АСПМ ДПД еще различима (в АСПМ ИК она доминирует), а ниже по частоте присутствует множество локальных максимумов, объясненных своим происхождением вибрациям оборудования петель.

Если в АСПМ ДПД наблюдаются такие особенности (см. резонансы 1,6, 3,4 3,9 Гц на рис. 8.3) а в сигнал ИК вносят свой вклад вибрации корпуса реактора, ВКУ и ТВС, то во взаимных характеристиках ДПД-ИК должны наблюдаться совместные колебания элементов петель, корпуса, ВКУ и ТВС. Существуют два объяснения, почему этого не наблюдается в эксперименте. Во первых, как будет показано ниже, совместные колебания оборудования петель и корпуса на собственных частотах представляют собой очень маломощные явления. Во-вторых, возникающие из-за вибраций оборудования бегущие волны давления ТН играют роль плохим посредником вибраций в том смысле, что они представляют низкокогерентные, затухающие в пространстве процессы. Совместные колебания оборудования петель и ВКУ лучше выявлять по взаимным характеристикам сигналов ИК и датчиков вибраций (перемещений), установленных непосредственно на оборудовании петель и на корпусе реактора.

По своим квадратичным амплитудам первые четыре АСВ: $АСВ_{КД}$, $АСВ_{П1}$, $АСВ_{1К}$, $АСВ_{1К}$ соотносятся как 3:40:1:7 (для данного размещения ДПД). Эти четыре спектральных линии являются основными силами, вызывающими вибрации как оборудования петель и трубопроводов, так и корпуса реактора, ВКУ и ТВС. Знание соотношения амплитуд АСВ различных типов важно для оценки уровня вызывающих сил, а также для верификации трехмерных расчетных программ оценивания АСВ, которая состоит не только в подгонке частот, но и соотношений амплитуд АСВ.

8.3 Фазовые соотношения в парах сигналов НК—НК, НК—ДПД

Четыре датчика — ДПД, НК7, НК14, НК21 — поставляют шесть фазовых соотношений (табл. 8.1 и рис. 8.5)

Для данных соотношений должен выполняться так называемый баланс фаз, в соответствии с которым, сумма фаз при обходе датчиков по замкнутому контуру должна быть кратна 2π . В таблице 8.1 это условие строго выполнено для любого из семи возможных контуров (при обходе необходимо менять знак фазы на противоположный, если направление обхода противоположно направлению, при котором получена данная фаза)

Фазовые характеристики на частотах того или иного источника нейтронного шума или шума пульсаций давления принимают, как правило, так называемые характерные значения 0 и π или π . Именно этим свойством, по определению, характеризуются АСВ: для произвольной пары точек в ЦК пульсации давления на частотах стоячих волн будут или в фазе, или в противофазе и, напротив, фазовые соотношения для бегущей волны — произвольны.

Экспериментально полученные фазы (см. табл. 8.1) в точности не равны характерным значениям фаз. Фазовые характеристики в виде малых отклонений от характерных значений 0 и π , дают диагностические признаки, по которым можно установить факты суперпозиции нескольких эффектов на одной и той же частоте.



Рис. 8.5. Расположение ДПД, НК7, НК14, НК21 и направления, по которым проводились оценки фаз

Таблица 8.1 Фазовые соотношения град для пар сигналов ДПД—НК и НК—НК

Частота Гц	ДПД НК7	ДПД НК14	ДПД НК21	НК7— НК14	НК14— НК21	НК21— НК7	Источник шума
1.1—3.0	Произвольные вследствие нулевой когерентности			140	—	175	Вибрации ТВС
3.9—4.3	5	—	165	—	—	170	АСВ _п
8.6—10.6	26	26	44	0	18	18	АСВ _д
12.2—13.4	34	140	—	174	—	170	АСВ _{нк}

Например, на частотах АСВ_{1к} тройка возможных фаз для пар ИК-ИК (0; 18°; -18°) значительно уклоняется от тройки (0, 0, 0), свидетельствующей о присутствии лишь одного глобального плотностного эффекта реактивности. В данном случае помимо этого эффекта, доминирующего во вкладе в сигналы ИК, на частотах АСВ присутствует еще и эффект вынужденных колебаний шахты АкЗ. Гипотетически, если бы не было такого мощного барометрического реактивностного маскирующего эффекта, то из-за колебаний шахты в парах ИК-ИК наблюдалась бы тройка фаз (0; π ; π).

Значительное отличие от нуля фаз в парах ДПД-ИК объясняется тем, что пара составлена из сигналов различной физической природы. Каждый из трактов измерения, включая и собственно детектор, вообще говоря, имеет свои фазовые набеги, и только в случае тождественности этих трактов фазовые набеги между ними будут нулевые. Следует очень аккуратно подходить к интерпретации таких фазовых характеристик, включая и случаи только нейтронных измерений. Например, фазы между сигналами антризонного и внезонного нейтронных детекторов (например пара ДПЗ-ИК) могут быть произвольны из-за различной физики регистрации нейтронов.



Рис. 8.6. Направление коллективных вибраций ТВС

Низкие когерентности на частотах АСВ_{1Д} не позволяют делать выводы о значимом уклонении оценок фаз от характерных значений.

Коллективные вибрации ТВС в табл. 8.1 отображены противофазами на уровне низких когерентностей только в парах ИК7-ИК21, ИК7-ИК14. Отсюда сразу с точностью $\pm \pi/3$ можно определить их направление (рис. 8.6). В петлях же отсутствуют пульсации давления из-за вибраций ТВС, поэтому фазы ИК ДПД на этой частоте произвольны.

8.4 АСВ в сигналах ДАП ИК ДПД ДПЗ ДОН

Сигналы четырех типов датчиков, традиционно применяемых в СВШК — ДАП, ИК, ДПЗ, ДПД — чувствительных к колебаниям корпуса ВКУ и ТВС впервые на ВВЭР-1000 в одной много-

б) опыта

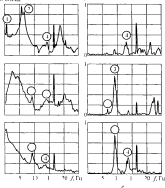


Рис. 8.7. АСПМ ДПЛ—ДАП (а), АСПМ ДАП—ДАП (б), АСПМ ИК (в), фазовые когерентности сигналов ДПЛ—ДАП (г), ДПЛ—ДАП (д), ДАП—ИК (е);

1 — АСВ_{КД} в 0,6 Гц; 2 — АСВ_{ЦД} в 0,8 Гц; 3 — АСВ_{КД} в 9,3 Гц; 4 — АСВ_{ДК} в 13,7 Гц (блок III БазАЭС)

конечной записи удалось зарегистрировать в ходе шумового эксперимента на блоке III БазАЭС (рис. 8.7) [7].

Резонанс компенсатора давления (АСВ_{КД}, $f = 0,6$ Гц) существенно образом не влияет ни на вибрации корпуса реактора, ни на вибрации шахты (см. пик 1 на рис. 8.7, а и нулевые когерентности ДПЛ—ДАП на рис. 8.7, г, д и ДАП—ИК на рис. 8.7, е).

Все АСПМ сигналов ДАП, ИК, ДПЗ содержат резонанс корпусной АСВ ($f = 9,3$ Гц) (см. пики, обозначенные цифрой 3, на рис. 8.7, б, в). В сигналах нейтронных датчиков (ИК, ДПЗ) он обусловлен совместным действием плотностного эффекта реак-

тивности и эффекта вынужденных вибрации. С одной стороны флуктуации сигнала нейтронного детектора возникают вследствие модуляции акустической волной плотности ТН в объеме АкЗ с другой стороны, данная АСВ вызывает механические колебания и корпуса и АкЗ, вследствие чего модулируется поток быстрых нейтронов утечки при изменении толщины водяного зазора в опускном участке. Примерно такое же воздействие на корпус РУ, но меньшее по мощности, имеет и АСВ_{ДК} 13,2 Гц (резонансы обозначенные цифрой 4 на рис. 8.7, *а—д*).

Доминируя в корпусе реактора, АСВ на частоте около 9,3 Гц имеет значительные градиенты амплитуды в «холодных» трубопроводах ГЦК и практически отсутствует в «горячих» трубопроводах (см. АСПМ ДПД_Г рис. 8.7, *а*). Поэтому и возбуждение вибраций корпуса реактора на частоте 9,3 Гц происходит со стороны «холодных» трубопроводов (см. когерентности на рис. 8.7, *з, д*).

Петлевая АСВ_П ($f = 6,8$ Гц, резонанс, обозначенный цифрой 2 на рис. 8.7, *а, б*) уступает по силе воздействия на корпус РУ АСВ_{ДК} ($f = 9,3$ Гц): резонанс АСВ_П не столь велик в функциях когерентности ДПД—ДАП и в разрешенном виде не наблюдается в АСПМ ДАП. Он же отсутствует в АСПМ ИК и в функциях когерентности ИК—ДАП (рис. 8.7, *е*). Эта АСВ внутри корпуса реактора при изменении азимутальной координаты меняет свой знак [8], в итоге результирующий плотностной эффект реактивности близок к нулю.

Для определения типов колебаний корпуса реактора на собственных частотах традиционно оцениваются фазы возможных пар сигналов ДАП (рис. 8.8). Последние имеют характерные значения в широких диапазонах частот что позволяет осуществлять грубую классификацию типов колебаний: (2—10) Гц — вертикальные колебания; (13—22) Гц — маятниковые колебания. Мощные высококогерентные, синфазные колебания корпуса реактора в НЧ-диапазоне до 6 Гц (см. рис. 8.7, *б* и рис. 8.8, *а*) не вызывают колебания шахты активной зоны (рис. 8.7, *е* — нулевая когерентность) и не вызывают колебания петель (рис. 8.8, *е* — нулевая когерентность). Элементы системы связанных масс «оборудование — петля — корпус реактора — ВКУ» развязаны по отношению к совместным колебаниям на собственных частотах.

Совместные колебания корпуса и оборудования петля происходят

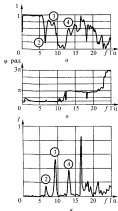


рис. 8.8. Вынужденные характеристики сигналов ДАП и ДОП_{ГЦН} (блок III БилАЭС)
 δ — когерентность ДАП1—ДАП2; ϕ — фаза ДАП1 ДАП2; α — когерентность ДАП1—ДОП_{ГЦН}

дают, в основном, на вынужденных частотах (пики АСВ №№ 2—4 и пик оборотной частоты ГЦН на рис. 8.7, *в*). Иными словами, собственные частоты колебаний всего ГЦК как глобальные свойства всей конструкции имеют не более чем петлевою локализацию, а различные АСВ, действующие изнутри контура — общеконтурную локализацию.

Частота АСВ_{ГЦН} приходится на диапазон очень высокой когерентности сигналов соседних ДАП (см. рис. 8.8, *а*), но в окрестности частоты АСВ_{ГЦН} наблюдается провал с практически единичной когерентностью до когерентности порядка 0,2. Этот эффект математически описывается той же моделью, что и так называемый эф

фект соседних ДПЗ при наличии глобального нейтронного шума (см. гл. 7). Напомним, что вибрации ТВС также уменьшают практически единичную когерентность сигналов ДПЗ, возникающую вследствие глобального нейтронного шума. Для сигналов ДАП роль глобального шума играют вертикальные колебания корпуса реактора, приводящие к синфазности и высокой корреляции сигналов ДАП, но на частоте $АСВ_{1П}$ появляется дополнительный источник, который в каждый из сигналов ДАП входит со своей фазой. Когерентность сигналов соседних ДАП максимально снижается когда $АСВ_{1П}$ дает противофазный вклад в каждый ДАП.

Пульсации давления в «холодном» трубопроводе играют особую роль не только в возбуждении колебаний корпуса реактора, но и в возбуждении колебаний ВКУ и ТВС. На рис. 8.9,а, б показано, что воздействие $АСВ_{1К}$ на внутризонный нейтронный шум усиливается с увеличением номера ДПЗ. Несмотря на то, что нижние ДПЗ расположены ближе к ГЦН (если вести отчет против потока ТН) чем верхние ДПЗ, внизу активной зоны действие $АСВ_{1К}$ минимально. По-видимому, аксиальное распределение $АСВ_{1К}$ внутри корпуса реактора монотонно возрастает по амплитуде к верху активной зоны. Определенно преобладает вибрационный эффект так как $АСВ_{1К}$ воздействует даже на корпус реактора.

Влияния пульсации давления ТН в холодном трубопроводе на вибрации ГЦН и на сигналы верхних ДПЗ практически совпадают (см. рис. 8.9,б, в). Это еще не означает что вибросостояния ГЦН и верхней части активной зоны совпадают по вынужденным колебаниям. Нельзя исключать и другую крайность: $АСВ_{1К}$ вызывает вынужденные вибрации ГЦН но в верхней части активной зоны данная $АСВ$ в сигналах ДПЗ проявляется через плотностной эффект, а вынужденные вибрации ТВС отсутствуют.

Когерентности между сигналами пульсаций давления ТН в горячем трубопроводе и нижними ДПЗ практически нулевые, поэтому и не приводятся. Но и по верхним ДПЗ пульсации давления ТН в горячем трубопроводе гораздо меньше влияют на активную зону, чем пульсации давления ТН в холодных трубопроводах (см. рис. 8.9,а, д).

Корпус реактора и ТВС имеют всего две частоты, на которых они взаимодействуют — оборотная частота ГЦН и частота $АСВ_{1К}$ (см. рис. 8.9,е).

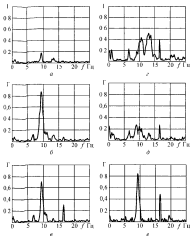


Рис. 8.9. Функции когерентности (блок III БМАНЭС):
 а — ДПЗ1—ДПД_х; б — ДПЗ7—ДПД_х; в — ДПЗ7—ДПД_у; г — ИК—ДПД_у; д — ДПЗ7—ДПД_у; е — ДПЗ7—ДПД_у; ф — ДПЗ7—ДПД_у

Первая петлевая АСВ в активной зоне проявляется как весьма слабое явление. В виде разрешенного резонанса ее можно обнаружить лишь в некоторых верхних ДПЗ (рис. 8.10).

Головка ТВС (по сравнению с остальными частями) подвержена максимальному воздействию первой петлевой АСВ. В какой степени соотносятся плотностной и вибрационный эффекты, здесь также экспериментально установить затруднительно. Однако не сомненно наличие значительных градиентов поля давления АСВ_{1П} и по горизонтали, и по вертикали, так как ее амплитуда резко убывает

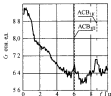


Рис. 8.10. АСПМ сигнала ДПЗ7 с разрешенными резонансами $АСВ_{\text{п}}$ и $АСВ_{\text{д}}$ (блок III КнАЭС)

вает по мере приближения к вертикальной оси реактора. Иными словами, в горизонтальной плоскости пружинных блоков ТВС присутствует раскачивающее воздействие данной АСВ. И ослабление вертикального прижимного усилия на ТВС, обусловленное уменьшением жесткости пружин или доработкой БЗТ, вызовет увеличение амплитуды вынужденных вибраций ТВС на частоте $АСВ_{\text{п}}$. Необычна форма этих вынужденных колебаний: жестко закрепленный нижний конец с нулевой амплитудой вибраций и максимальной амплитудой вибраций в пружинном блоке.

8.5 Коллективные вибрации ТВС

На рис. 8.11 представлена картограмма распределения нормированных на постоянную составляющую тока ДПЗ амплитуд АСПМ ДПЗ1 на частоте коллективных колебаний ТВС, равной 2,6 Гц. Подчеркнем, что это не амплитуды вибраций, а именно значения АСПМ. Как следует из рис. 8.11, максимальное значение отличается от минимального более чем в 20 раз. На периферии АкЗ, там, где градиенты статического нейтронного поля велики, значения АСПМ достигают максимума, напротив, в центре АкЗ — минимума. Тем самым подтверждается гипотеза о механизме возникновения флуктуаций тока ДПЗ на частоте коллективных вибраций ТВС изложенная в гл. 7, в соответствии с которой подвижное распределение нейтронного поля модулирует ток ДПЗ.

В соответствии с другой теорией изложенной в гл. 7, такие же особенности флуктуаций тока ДПЗ (минимум в центре АкЗ, максимум на периферии) характерны и для вибрирующей шахты. Столь низкая собственная частота (2,6 Гц) не может быть собственной частотой шахты ВВЭР-1000, но справедливо предположить, что коллективные колебания ТВС вызывают вынужденные колебания шахты, которые изменяют границы активной зоны в результате чего возникают флуктуации тока ДПЗ.

На значение АСПМ в невяном виде влияет и направление коллективных колебаний ТВС, так как градиент нейтронного поля вычисляется именно по этому направлению. Максимальные значения АСПМ (2,3 отн. ед.) достигаются на периферийных ТВС в первом и пятнадцатом рядах (см. рис. 8.11), которые оказались на прямой, более всего приближенной к направлению коллективных колебаний.

До сих пор упоминалась только одна частота коллективных вибраций — 2,6 Гц. На самом деле можно наблюдать несколько дискретных линий в довольно широком диапазоне частот, объясняемых своим происхождением вибрациям ТВС. Родство таких резонансов подтверждается всеми признаками коллективных вибраций перечисленными в гл. 7. Кроме того, по какой бы сложной траектории не перебирать ТВС в АкЗ, распределения амплитуд АСПМ на данных частотах подобны друг другу. На рис. 8.12 выбрана траектория с монотонным возрастанием номера слоя ТВС вследствие чего кривые распределения амплитуд АСПМ полученные на частотах коллективных вибраций, отражают распределение статического нейтронного поля: возрастание его градиента на периферии АкЗ. Данное свойство подобия распределений АСПМ не зависит от горизонта уставки ДПЗ (см. рис. 8.12).

Как следует из расчетных моделей вибраций ТВС, разные условия обжатия топлив дистанционирующими решетками, а также условия контактирования таблеток топлива с оболочкой твэла



Рис. 8.11. Амплитуды АСПМ ДПЗ1 отн. ед., на частоте 2,6 Гц (блок I КЛИАЭС)

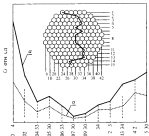


Рис. 8.12. Качественный вид распределения амплитуд АСРМ ДРЗ на частотах 2,5 Гц (а) и 2,8 Гц (б), блок 1 КинАЗС

могут привести к сосуществованию нескольких дискретных, рядом стоящих линий собственных частот вибраций в одной ТВС.

В одном крайнем случае, когда все твэлы не связаны с ДР, вся масса топлива через узлы крепления твэлов в нижней опорной решетке сосредотачивается в одном горизонте нижней части ТВС и это соответствует самой низкой собственной частоте вибраций. В другом крайнем случае, при полном обжатии твэлов дистанцирующими решетками, собственная частота максимальна. В реальной ТВС степень обжатия твэлов разными ДР имеет некоторый разброс. С учетом этого, самый широкий расчетный диапазон возможных собственных частот первой гармоники вибрации ТВС находится в пределах (1,4—4,1) Гц.

Существует механизм нелинейного расширения данного диапазона частот. Используя гармонический признак вибраций ТВС (см. гл. 7), покажем, что их частоты обнаруживаются в довольно широком диапазоне. На рис. 8.13 представлено семейство функций когерентности сигналов удаленных ДРЗ расположенных в ТВС с координатами 15—24 и 01—26.

Стрелки на графике связывают одну частоту резонанса с прак

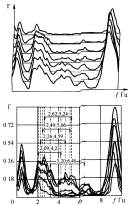


Рис. 8.13. Функции когерентности сигналов удаленных ДПЗ, установленных в ТВС с координатами 15–24 и 01–36 (блок III Билд/ЖС), стрелками показаны гармоники

точески в точности вдвое больше частотой другого резонанса. Иными словами, в результате нелинейных преобразований диапазон частот первых гармоник (например, окрестности 2,6 Гц) расширяется вследствие удвоения различных частот вибраций ТВС. Таким образом, покрывается диапазон от 1,4 до 7 Гц, в котором значения фаз очень близки к π .

Напомним что для удаленных ДПЗ глобальный компонент нейтрального шума практически отсутствует, поэтому в оценке фаз смещения не наблюдается, и расположенные рядом вибрационные резонансы разрешаются лучше, чем для соседних ДПЗ.

На рис. 8.13 хорошо видна следующая закономерность: пары сигналов в горизонте первых ДПЗ имеют меньший частотный

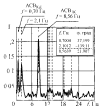


Рис. 8.14. Функции когерентности и таблица фаз для пары сигналов ДПЗ1 (93—345) — ДПЗ1 (11—24) (блок I КванЭЭС)

диапазон противофазности по сравнению с другими парами ДПЗ в этих же каналах. Здесь может быть всего один резонанс, как на рис. 8.14 резонанс 2,1 Гц, или группа резонансов в узком диапазоне частот (на таблицах приведенных на рис. 8.15 специальными значками помечен диапазон противофазности)

Однако если рассмотреть seno-ство функций когерентности сигналов одноименных ДПЗ по вертикали АкЗ, то всегда диапазон противофазности для пары ДПЗ1—ДПЗ1 более узок нежели

для любых других пар (рис. 8.15). Кроме того, с ростом аксиальной координаты растет и само значение когерентности.

Этот эффект можно объяснить различиями закрепления головки и хвостовика ТВС, а также разными граничными условиями для нижней и верхней частей твэла. В особых условиях находится хвостовик твэла, который должен быть жестко закреплен в нижней опорной решетке ТВС. Кроме того и хвостовик самой ТВС в своей проектной посадке жестко контактирует с опорной плитой, нежели пружинный блок головки ТВС с БЗТ. По-видимому, вследствие таких ограничений степеней свободы в нижней части ТВС возбуждается малое число резонансов и возникает узкий диапазон противофазности сигналов ДПЗ1—ДПЗ1. Далее вверх по ТВС уже начиная с горизонта ДПЗ2 влияние этих факторов монотонно снижается.

На рис. 8.15 продемонстрирована аксиальная зависимость ширины частотного диапазона противофазности и числа резонансов в нем для ТВС срединного 8-го ряда

Таким образом в одной ТВС существуют несколько близких по качеству групп контактов «твэл — ДР» которые обуславливают несколько рядом стоящих собственных резонансных частот всей конструкции ТВС. Широкий диапазон собственных частот вибраций ТВС свидетельствует о том, что условия закрепления

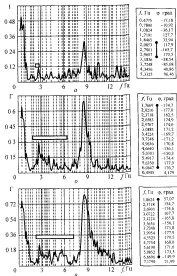


Рис. 8.15. Функции когерентности и таблицы фаз для пар сигналов ДПЗ в сборках 08—17 и 08—33 в трех горизонтальных уровнях (блок I КемАЭС): ДПЗ1—ДПЗ1 (а); ДПЗ5—ДПЗ5 (б); ДПЗ7—ДПЗ7 (в) — выделены диапазоны противофазности сигналов

твлов изменяются в широких пределах. Ширина этого диапазона частот, а также число дискретных линий в нем являются диагностическими признаками, по которым можно в эксплуатационных условиях производить вибромониторинг качества фиксации твлов в ДР. Это будут статистические параметры, характеризующие ТВС в целом, так как возникновение той или иной

резонансной частоты обусловлено коллективным поведением не
каждого числа близких по качеству контактов -тол — $\Delta P_{\text{к}}$.

При выборе пар удаленных ДПЗ для мониторинга коллективных вибраций ТВС необходимо стремиться к максимальной когерентности сигналов. Тогда оценки диапазона противофазности и параметров резонансов из этого диапазона будут высококачественными. В большинстве случаев когерентности невелики (не превышают 0,2). Перебрать всевозможные пары удаленных ДПЗ практически невозможно – даже если выбирать ДПЗ из одного го

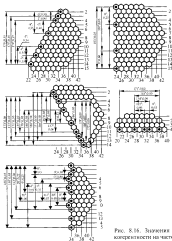


Рис. 8.56. Заданный фаз и функций
конкретности на частоте 2,6 Гц для пар
ДП31—ДП31 (блок 1 КларА3С)

ризонта. Большинство пар датчиков очень низкую когерентность. Максимум же когерентности наблюдается для тех пар датчиков, для которых направление малых активных колебаний обеспечивает максимальные градиенты сечения нейтронного поля.

На рис. 8.16 совокупность всех оценок функций когерентности в шумовом эксперименте на блоке 1 КЛН-АЭС наложена на картограмму АкЗ по различным направлениям. Из рисунка видно, что максимум когерентности существенным образом зависит от направления коллективных вибраций ТВС.

Некоторое число резонансов в функции когерентности сигнала удаленных ДПЗ не дает полного представления о вибросостоянии каждой из ТВС. Функция когерентности эффективна при выделении общих признаков, присущих как одной, так и другой ТВС. Информация же об индивидуальных вибросвойствах ТВС содержится в АСПМ. Поэтому после выделения диапазона промывочности по функции когерентности, его необходимо не сколько расширить для контроля резонансов по АСПМ ДПЗ. Для контроля вибрации ТВС необходимо зафиксировать ширину частотного диапазона и число резонансов в нем у «свежей» ТВС, а потом в течение топливного цикла регистрировать с достаточно малым временным интервалом изменения перечисленных диагностических признаков (например, раз в неделю).

В гл. 7 было введено понятие «соседние ДПЗ», характеризующее тем, что оба датчика находятся в зоне действия одного и того же глобального нейтронного шума. Поэтому их сигналы синфазны и высококочерентны в 44-диапазоне. Эффекты вибрации ТВС в соседних ДПЗ маскируются глобальным нейтронным шумом и проявляются в виде мелких локальных минимумов функции когерентности. На рис. 8.17 собраны семейства функций когерентности сигналов таких пар ДПЗ, к которым применимо понятие соседних. Среди них есть, как рядом стоящие ДПЗ, т. е. буквально соседние ДПЗ из соседних ТВС, так и ТВС отстоящие друг от друга на несколько рядов (не более пяти).

Общее свойство приведенных функций когерентности состоит в том, что в диапазоне частот между двумя резонансами АСВ — $АСВ_{кл}$ ($f = 0,6$ Гц) и $АСВ_{к}$ ($f = 9,0$ Гц) — когерентность имеет характерный вид лепестки $\sin^2$ -структуры. Вначале наблюдается один большой локальный минимум вблизи 1 Гц (1 я $\sin^2$ -часто

та как элемент *link*-структуры), далее следует диапазон больших значений функции когерентности с мелкими локальными минимумами (вибрационные эффекты) и далее — перед ACB_{IK} — вторая *link*-частота.

Понятие «соседние датчики» распространимо и на пары ДПЗ ИК. На рис. 8.18 представлены семейства функции когерентности сигналов ИК и ДПЗ в диапазоне частот (0–9) Гц. ДПЗ выбраны из трех ТВС расположенных на одной прямой. ДПЗ из ТВС с координатами 02–21 и 04–25 по отношению к ИК14 являются соседними в силу того, что когерентности их сигналов близки к единице в НЧ-диапазоне и имеют характерную форму *link*-ребенка. Заметим, что в зоне действия одного глобального

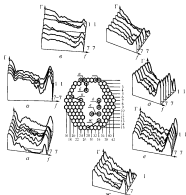


Рис. 8.17. Семейства функции когерентности сигналов одиночных ДПЗ (1–12—2, ..., 7–7), к которым применено понятие соседних ДПЗ (блок III БилАЭС): а — КНИ 06-18 и 07-24; б — КНИ 02-27 и 04-27; в — КНИ 01-24 и 01-26; г — КНИ 01-32 и 01-34; д — КНИ 07-34 и 08-34; е — КНИ 11-30 и 11-34; ж — КНИ 13-34 и 15-28

зашумления оказались внезонная ИК и ДПЗ установленные в четвертом ряду ТВС. Пара ИК14 — ДПЗ 13—34 представляет собой пару удаленных датчиков, у которых нет общего гравитационного зашумления, и в НЧ-диапазоне контрастно выделяется эффект коллективных вибраций ТВС.

Флуктуации сигналов удаленных ИК и ДПЗ так же, как флуктуации сигналов удаленных ДПЗ, противофазны на частотах коллективных вибраций ТВС (рис. 8.19). Ближайшая к ИК14 плоскость активной зоны до оси симметрии (на рис. 8.19 ось симметрии обозначена пунктирной линией) будет поставлять синфазный сигнал, другая половина — противофазный. Действительно, если АКЗ удалится от ИК7 в некоторой фазе коллективных колебаний ТВС

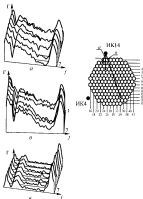


Рис. 8.18. Семейства функции коррентности сигналов ДПЗ—ИК в диапазоне 0—10 Гц (Блок III БазАЭС):

а — КНН 03-23 — ИК14; б — КНН 04-25 — ИК14; в — КНН 13-34 — ИК14

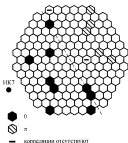


Рис. 8.19. Пары синфазных и противофазных сигналов ИКТ ДПЗ1 на частоте 2,8 Гц (блок 1 КласЭС)

то сигналы ДПЗ расположенных в первой половине АкЗ, будут ослабевать, т.к. уменьшается величина статического нейтронного потока, но также уменьшается и сигнал ИКТ так как увеличивается толщина водяного зазора между корпусом и шахтой

В методе трех датчиков для контроля вибраций ТВС (см. гл. 7) необходимо так подобрать ДПЗ чтобы одна пара состояла из соседних ДПЗ, а две другие — из удаленных. Соседние ДПЗ расположенные на минимально возможном расстоянии Δ_s , дают функцию когерентности, настолько близкую к единице что локальные вибрационные минимумы практически не разрешаются, и разность $1 - \Gamma(f)$, стоящая в знаменателе выражения (7.17), практически равна нулю, что приводит к значительной погрешности оценки относительной амплитуды вибраций. На рис. 8.20 представлены варианты выбора трех ДПЗ. В первом варианте случай минимального расстояния между соседними ДПЗ с очень высокой когерентностью, во втором — оптимальное расстояние при котором когерентность сигналов соседних ДПЗ не столь велика и вибрационные минимумы хорошо разрешены. В обоих случаях удаленные ДПЗ дают контрастную с достаточной когерент

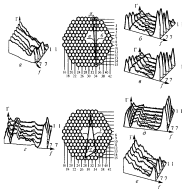


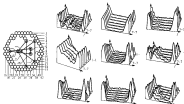
Рис. 8.20. Для выбора ДПЗ для метода трех датчиков (блок III БалаЭС): а — когерентность ДПЗ 01-32 — ДПЗ 01-34; б — когерентность ДПЗ 01-34 — ДПЗ 13-34; в — когерентность ДПЗ 01-32 — ДПЗ 13-34; г — когерентность ДПЗ 02-31 — ДПЗ 13-28; д — когерентность ДПЗ 02-31 — ДПЗ 13-34; е — когерентность ДПЗ 13-34 — ДПЗ 13-28

ностью, картируя коллективных вибраций ТВС

Рассмотрим подробнее возможные эффекты, определяющие вид функции когерентности сигналов ДПЗ, в зависимости от их взаимного местоположения в активной зоне. На рис. 8.21 представлены девять функций когерентности

Начнем рассмотрение с верхней пары (08-27 — 04-37) и далее по часовой стрелке. В анализе между частотами резонансов ACB_{kd} и ACB_{k1} когерентность пары сигналов ДПЗ с координатами:

(08-27 — 04-37) — очень низка вследствие того, что один из ДПЗ (08-27) находится в практически нулевом градиенте статического распределения нейтронного потока

[illegible]

(09-34 — 07-34) — имеет ярко выраженный *zink*-дефект: своим стесненным соседним ДПЗ;

(04-37 — 12-37) — имеет слабый вибрационный эффект, возможно, потому, что один из ДПЗ (12-37) находится в малом градиенте нейтронного поля;

(14-31 — 04-31) — имеет ярко выраженный вибрационный эффект с монотонным нарастанием по направлению вверх;

(08-27 — 04-37) — очень низка, так как один из ДПЗ (08-27) находится в практически нулевом градиенте статического распределения нейтронного потока;

(14-31 — 08-25) — очень низка из-за того, что один из ДПЗ (08-25) находится в практически нулевом градиенте статического распределения нейтронного потока;

(09-34 — 08-19) — имеет ярко выраженный вибрационный эффект;

(08-19 — 07-34) — имеет ярко выраженный вибрационный эффект;

(08-25 — 04-31) — очень низка из-за того, что один из ДПЗ (08-25) находится в практически нулевом градиенте статического распределения нейтронного потока.

8.6. Характерные особенности взаимных спектральных функций сигналов ДПЗ в ИК, не связанные с эффектами вибрации ВКУ и ТВС

Спектральные образы вибрации ВКУ существуют на фоне иных источников нейтронного шума. Об одном из них — глобальном нейтронном шуме, определяющем отношения между сигналами двух ДПЗ разных ТВС, как удаленных, так и соседних — упоминалось выше. Другой мощный эффект, связывающий сигналы ДПЗ, установленные в одной ТВС — так называемый эффект переноса, состоящий в транспортировке вверх по активной зоне теплогидравлических источников нейтронного шума вместе с потоком ТН.

Аналитическое описание эффекта переноса производится в рамках нейтронно-температурных шумовых моделей, о которых упоминалось в гл. 7 с точки зрения модуляции спектральных характеристик нейтронного шума *zink*-структурами. Эффект пере

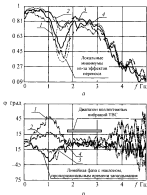


Рис. 8.22. Когерентности (а) и фазы (б) сигналов ДПЗ, установленных в одной ТВС (блок 1 КлимАЗС):

1 ДП34–ДП31 2 ДП34 ДП33 3 ДП34 ДП35 4 ДП34 ДП37

носа — один из источников *zink*-структур, кроме того он приводит к тому, что фазы между сигналами ДПЗ становятся близки к линейным зависимостям в некотором интервале частот, а из их наклона можно извлечь время запаздывания одного процесса по отношению к другому.

На рис. 8.22 изображены сигналы пар ДПЗ; один из ДПЗ расположен в центре АкЗ (ДП34). Для пар ДП34–ДП31 и ДП34–ДП33 положительный наклон фазы характеризует эффект опережения сигнала для пар ДП34 ДП35 и ДП34–ДП37 отрицательный наклон — эффект запаздывания. Чем более разнесены по высоте ДПЗ тем больше наклон фазы, и тем больше функция когерентности «изрезана» *zink*-структурами. Таким образом если vibra

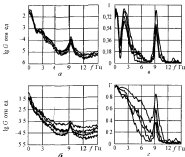


Рис. 8.23. АСПМ ДП31 (а) и ДП37 (б) для четырех ТВС (блок III БалАЗС). Функции когерентности для ТВС с номерами 1 и 7 (а), ДП3 с номерами 1 и 2 (б)

ционным резонанс проявляется во взаимных спектральных характеристиках сигналов ДПЗ, то его фаза будет искажена линейной зависимостью, а когерентность — *sin*k-структурами, причем искажения тем больше чем далее разнесены ДПЗ.

Для АСПМ ДП31 *sin*k структура менее всего влияет на НЧ диапазон, так как ее щель наиболее широкая. Для ДПЗ, расположенных в верхней части АкЗ, у которых апертура может составлять величину порядка 1 Гц, диапазон частот вибраций ТВС может быть «нарезан» несколькими *sin*k-частотами. На рис. 8.23 представлены типичные АСПМ ДП37 и ДП31. В АСПМ сигналов ДП37 в области [1,5 — 3,0) Гц *sin*k-структуры образуют пологий локальный максимум, который не имеет отношения к вибрациям ТВС, хотя и совпадает с ними по диапазону частот, в то время как АСПМ ДПЗ является практически монотонно убывающей функцией. Максимально удаленные друг от друга ДП31 и ДП37 дают самый глубокий минимум когерентности на *sin*k-частоте (см. рис. 8.23).

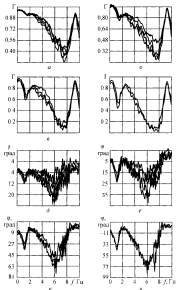


Рис. 8.14. Семейства функций когерентности (а–г) и соответствующие фазы (д–и), составленные по парам ДПЗ, расположенных на единичном расстоянии: а, б – пары 2–3, 3–4, 4–5, 6–7 (расстояние Δz); в, е – пары 2–4, 3–5, 3–5, 5–7 (расстояние $2\Delta z$); г, ж – пары 2–5, 3–6, 4–7, 4–7 (расстояние $3\Delta z$); з, и – пары 2–6, 3–4, 3–7 (расстояние $4\Delta z$).

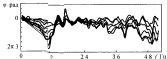


Рис. 8.25. Семейство фазовых характеристик сигналов ДПЗ установленных в ТВС 07-34-ДП31—ДП32—7 (блок I КмАЭС)

Для функции когерентности между сигналами ДПЗ расположенных в одной ТВС определяющим является расстояние между ДПЗ (рис. 8.24). Когерентность между сигналами ДП32 и ДП33 практически не отличается от когерентности между сигналами ДП36 и ДП37, так же как когерентность всех сигналов других датчиков, расположенных на минимальном расстоянии. То же самое относится и к другим семействам когерентностей для сигналов ДПЗ расположенных на одном и том же расстоянии друг от друга. Аналогичный вывод можно сделать и по семействам фаз изображенных на рис. 8.24, а—г. Таким образом вид этих взаимных спектральных характеристик (когерентности и фазы) формируется главным образом за счет эффекта переноса.

Первая *звч*-частота делит фазовую характеристику на два поддиапазона с различными наклонами прямолинейных участков. По рис. 8.24—8.25 можно выделить близкие к прямолинейным участки в двух диапазонах частот приблизительно 0,2—1,2 Гц и 2—5 Гц.

Если в диапазоне (0—1,2) Гц фазы ВСПМ сигналов ДПЗ ДП3 аппроксимировать прямой, извлечь время запаздывания и по нему перейти к скорости ТНН (рис. 8.26), то измеренная скорость всегда превосходит истинную, а погрешность ее определения тем больше чем ближе находится ДПЗ пары. Еще большая погрешность оценки скорости ТНН будет, если использовать диапазон частот (2—5) Гц. Здесь наклон фаз практически вдвое меньше чем в диапазоне (0,2—1,2) Гц.

На прямолинейном участке в диапазоне частот шириной Δf на бег фазы $\Delta \varphi$ связан с временем запаздывания t выражением $\Delta \varphi = 2\pi \Delta f t$. Параметр $\Delta \varphi_f / \Delta f$, называемый трендом и время запаздывания t представлены в таблицах на графиках рис. 8.27



Рис. 8.26. Оценки поперечных скоростей теплоносителя из наклона фазовых характеристик между сигналами ДПЗ одного КНИ:

1 — проектное значение; 2 — КНИ 11-24; 3 — КНИ 10-27; 4 — КНИ 09-24; 5 — КНИ 15-30 ($\Delta x = 305$ мм)

Из рис. 8.27 следует, что оценка скорости ТН произведенные по разным ТВС одной активной зоны, отличаются на 30%. Подобные оценки, полученные на блоке I КппАЭС (см. рис. 8.25) и блоке III БалаАЭС (см. рис. 8.27), отличаются вдвое. Эти графики иллюстрируют опасность прямого вычисления поканальной скорости теплоносителя из наклона фазовых характеристик. Такое отличие фазовых характеристик нельзя объяснить разной скоростью теплоносителя в разных ТВС.

Наиболее важные факторы, обуславливающие разные наклоны фазы в сигналах ДПЗ разных ТВС перечисляемые ниже по силе их воздействия, состоит в следующем:

- различие соотношения между глобальным и локальным компонентами в разных ТВС;

- отличие эффективностей ДПЗ вследствие их неодинакового выгорания в ТВС разного срока эксплуатации;

- разный аксиальный профиль энерговыделения $F(z)$ в различных ТВС;

- пространственная зависимость источников $G_{\text{вд}}(f)$, $G_{\text{вг}}(f)$

Пространственная зависимость источников $G_{\text{вд}}(f)$, $G_{\text{вг}}(f)$ возникает в результате неполного перемешивания теплоносителя на входе в активную зону. Для ТВС расположенных рядом допус-

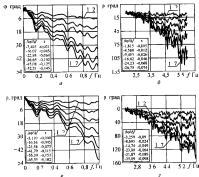


Рис. 8.27. Совместно фазовых характеристик сигналов ДПЗ установленных в од. той ТВС (блок III БилАМС):

а, б — КНН 01-37 (1—2, 1—7); в, г — КНН 02-23 (1—2, 1—7)

ние о точности источников $\delta T_{\text{вн}}(\omega)$, $\delta Q(\omega)$ вполне приемлемо. Это доказываются высокой когерентностью между сигналами ДПЗ, расположенных в соседних ТВС. На рис. 8.28 сигнал ДПЗ7 в ТВС 01-26 коррелирует со всеми сигналами ДПЗ соседней ТВС 02-27. Более того, для них сохраняется и линейный режим фаз. Создается впечатление, будто все датчики находятся в одной ТВС. На самом деле происходит перенос одного и того же точечного источника, (например, $\delta T_{\text{вн}}(\omega)$ или $\delta Q(\omega)$, или обоих вместе) по двум соседним каналам. В высокую коррелируемость сигналов ДПЗ соседних ТВС вносят некоторый вклад и поперечные составляющие скорости ТН, возникающие вследствие перемещения ТН внутри АкЗ, составленной из бесчисловых ТВС.

Высокая коррелируемость наблюдается для сигналов НК и ДПЗ

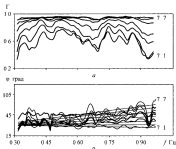


Рис. 8.28. Когерентность (а) и фаза (б) для сигналов пар ДПЗ, усвоенных в соседних ТВС (ДПЗ7 КНИ 01-26 — ДПЗ1—7 КНИ 02-27), блок I КанАЗС

если эти датчики не слишком удалены друг от друга (рис. 8.29). В их функции когерентности присутствует *sink*-структура с *sink*-частотой, которая изменяется с изменением координаты ДПЗ, а фазовая характеристика имеет два прямолинейных участка, как и для сигналов соседних ДПЗ разных ТВС. Это подобие уже нельзя объяснить поперечным перемещением ТН в активной зоне. Наличие линейных участков фазы у пары соседних ИК ДПЗ объясняется тем, что нейтроны утечки, поглощенные в чувствительном материале ИК, были промодулированы движущимися теплогидравлическими источниками нейтронного шума.

В зависимости от того, из какого сечения активной зоны выбираются ДПЗ, взаимные характеристики ДПЗ-ДПЗ и ДПЗ-ИК будут иметь тот или иной характерный вид. На рис. 8.30 собраны семейства АСПМ и функций когерентности ДПЗ-ДПЗ и ДПЗ-ИК, полученные по различным сечениям АкЗ. Все они оценены в диапазоне частот (0–10) Гц и у всех наблюдается пик на частоте АСВІК 8,6 Гц.

Для удаленных пар ИК ДПЗ построены семейства функций ко

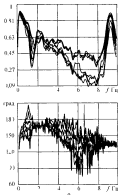


Рис. 8.29. Когерентность (а) и фаза (б) сигнала НК 4 ДПЗ канала 94-25 (ола, III БилАЭС)

герентности (см. рис. 8.30, а, б), представленные в том же вертикальном ряду. Их отличие обусловлено разными углами между направлением коллективных колебаний ТВС и прямой соединяющей датчики.

Рассмотрим другие особенности этих семейств. На рис 8.30, в—г) приведены семейства функций когерентности для трех ТВС, одна из которых является периферийной. Каждое из семейств получено коррелированием сигнала ДПЗ1 последовательно со всеми другими сигналами ДПЗ этого же КНИ (1—2, 1—3, ... 1—7).

Хотя семейства подобны друг другу, основные их отличия состоит в разных соотношениях глобального и локального шума и в разных особенностях *sink*-структур (глубина минимума на *sink*-частоте, его место положение на оси частот, ширина лепестка и

г.д.). Этими отличиями будут обусловлены расхождения в оценках времени запызывания по соответствующим фазовым характеристикам.

Рис. 8.30, г, ж — семейства функций когерентности сигналов двух ТВС — иллюстрируют эффекты ближней (соседние ДПЗ) и дальней (удаленные ДПЗ) зон.

На рис. 8.30,а—р приведены семейства АСПМ сигналов ДПЗ различных ТВС. Выбраны шесть ТВС, симметрично расположенных по отношению к вертикальной оси активной зоны, каждое из семейств АСПМ соответствует одному определенному номеру ДПЗ. В АСПМ на рис. 8.30,и (соседние ДПЗ) можно обнаружить явн-структуры с малыми аперттурами, АСПМ на рис. 8.30,а (первые ДПЗ) — практически монотонные функции вплоть до частоты $\Delta\omega_{\text{вк}}$. Следует обратить внимание на существование в некоторых сигналах ДПЗ собственного некоррелированного детекторного зашумления, близкого к белому шуму (см., например, рис 8.30, в, р).

8.7 Изменяемость спектральных образов во времени

Данный раздел посвящен вопросам нестационарности наблюдаемого объекта. Все рассмотренные выше модели базировались на предположении стационарности реакторных шумов, т.е. неизменяемости во времени их характеристик и, в частности, спектральных образов (СО). Далее предполагалось, что положение и развитие во времени виброшумовых аномалий будет менять некие параметры этих СО. Иными словами, в конечном счете, назначение СВШД — выявление нестационарности. Из опыта виброшумовой диагностики РУ постулируется, что это — «медленные» нестационарности, связанные с процессом износа и старения оборудования, которые и порождают «медленные» трендовые изменения СО. Поэтому СВШД является системой периодического действия.

Исследование трендов как причины той или иной неисправности требует индивидуального подхода и, прежде всего, основывается на экспериментальном материале. Необходимо набирать достаточную статистику, чтобы сформулировать понятие нормы для каждого СО. Поэтому на первом этапе функционирования СВШД

измерения должны проводиться чаще, чем это регламентируется для СВШД, прошедшей стадию опытной эксплуатации

Очевидный источник изменчивости СО — случайный характер наблюдаемых процессов. Две последовательные оценки СО стационарного случайного процесса будут всегда отличаться друг от друга только потому, что они произведены по конечным выборкам. Современные СВШД делают этот источник нестационарности ничтожно малым. Однако реальные СО чаще всего имеют некоторую изменчивость во времени. Это означает, что нестационарность свойственна реакторным шумам по самой физической природе их происхождения.

Например, изменение нейтронного шума реактора обусловлено процессами выгорания топлива, накопления продуктов деления и изменения концентрации борной кислоты. Перечисленные процессы могут вдвое увеличить дисперсию нейтронного шума за кампанию, и этот тренд является нормой для СО нейтронных шумов.

Нормой является монотонный тренд собственной частоты вибраций шахты за кампанию из-за монотонного уменьшения жесткости упругих трубчатых сегментов. На ППР производится замена трубчатых сегментов и в начале следующей кампании частота вибраций шахты должна восстановиться до своего максимального значения. Нормой также можно считать монотонное увеличение амплитуды вибраций шахты на низшей собственной частоте в течение всего срока эксплуатации реактора вследствие постепенного износа виброгасителей (монотонного увеличения зазоров между шахтой и виброгасителями).

Во всех перечисленных случаях изменения частоты, амплитуды резонанса, дисперсия НШ необходимо определить, до каких пределов допустимо изменение той или иной особенности СО. Например, по многократным сопоставлениям трендов СО с геометрическими измерениями ВКУ и узлов их крепления при проведении ППР можно экспериментально выработать верхний и нижний пороги для частоты вибраций шахты. Такой статистический подход отличается самыми большими временными затратами. В любом случае, будет ли эта деятельность поддержана расчетными исследованиями или нет, работу по набору статистики СО необходимо начинать сразу после внедрения СВШД.

До сих пор рассматривались большие временные масштабы не

стационарности реакторных шумов, сопоставляемые с кампанией реактора или даже со сроком его эксплуатации. Однако нестационарности обнаруживаются уже на длине выборки порядка 1000 с. На временных интервалах такого порядка обычно получают единственную оценку какого-либо СО. Иными словами, присутствующая нестационарность будет определять изменчивость единственной оценки данного СО.

Рассмотрим спектральные образы вне- и внутризонного нейтронного шума на длине 1000 с (рис. 8.31). Все особенности АСПМ сигналон ИК и ДПЗ состоит из резонансов АСВ и резонанса обратной частоты ГЦН. Именно по резонансу обратной частоты ГЦН видно, что рассматриваемые процессы нестационарны. Возможно, что взаимодействие четырех ГЦН приводит к эффекту биеений.

ДПЗ чувствителен к высокочастотным АСВ (см. резонансы на частотах выше 16 Гц), длина волны которых такова, что в активной зоне высеются как положительные, так и отрицательные полушины, в результате чего совместный глобальный барометрический эффект близок к нулю. Поэтому к высокочастотным АСВ мониторинговая камера радиочувствительна, и функция когерентности ИК-ДПЗ на частотах выше 16 Гц практически нулевая.

В функции когерентности ИК-ДПЗ единственная особенность — резонанс $АСВ_{1k}$ — имеет регулярный, неизменный во времени характер. В диапазоне частот коллективных вибраций ТВС (1,5—3,0) Гц изменяются во времени как частоты резонансов, так и их амплитуды, несмотря на то, что когерентность довольно высокая.

Об уровне разброса около среднего можно судить также и по рис. 8.32, на котором приведены все оценки рассматриваемой функции когерентности (заштрихованный коридор) и их среднее (темная линия на графике).

Разброс вокруг среднего на частоте $АСВ_{1k}$ минимален, а все другие спектральные особенности характеризуются разбросами, которые не укладываются в точечную статистику стационарных случайных процессов.

В частности, коллективные колебания большого числа ТВС разного срока эксплуатации, имеющие разброс по своим вибрационным свойствам, если процесс нестационарный или, точнее, сла-

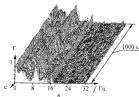
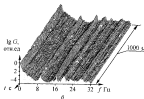
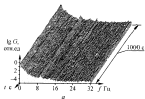


Рис. 8.31. АСПМ сигналов НК (а) и ДДЗ (б) и их спектральность (в) за временном интервале 1000 с (блок III БазАСС)

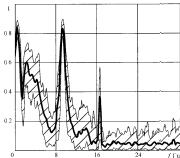


Рис. 8.32. Функция когерентности сигналов НК—ДПЗ

бонестационарные. Совокупные вибрационные свойства ТВС могут изменяться во времени при изменении точек контактирования соседних ТВС вследствие их соударения. Поэтому существуют несколько близких друг к другу устойчивых вибросостояний коллектива ТВС, которые попеременно доминируют в разных временных интервалах. Нестационарный характер коллективных вибраций ТВС контрастно проявляется по функциям когерентности сигналов удаленных датчиков (рис. 8.33).

Высокий уровень стационарности свойствен сигналам ДОП и ДПД (рис. 8.34, 8.35). Основное оборудование петель (ГЦН, ПГ) вибрирующее на собственных частотах, частотах различных АСВ и оборотной частоте ГЦН, имеет практически неизменные во времени СО на всех перечисленных частотах. Иными словами по отношению к ВКУ и ТВС можно считать, что внешние вынуждающие вибрации силы носят стационарный характер.

Вибрации корпуса реактора только в НЧ-диапазоне до 6 Гц имеют стационарный вид (рис. 8.36). В этом диапазоне частот происходят вертикальные колебания корпуса. Все другие типы колеба-

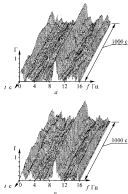


Рис. 8.33. Функция когерентности систем: НК4 – НК14 (а) и НК14 – ДПЗ 13–34 (б) блок III БалАЗС

ний на собственных и вынужденных частотах слабостационарны. Этот вывод можно распространять и на совместные колебания корпуса шахты и ТВС на вынужденных частотах (см. рис. 8.36).

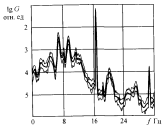
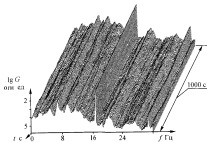


Рис. 8.34 АСПМ сигнала ДОП установленного на ГЦН

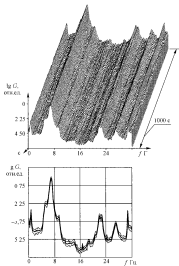


Рис. 8.35 АСПИ сч. налад. ДПД (блок III БэлАЭС)

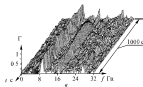
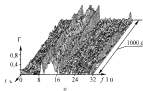
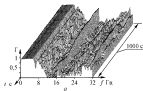


Рис. 8.36. Функции когерентности сигналов ДАП: ДАП (а), ДАП—ИК (б) и ДАП—ДПЗ (в), блок ППБалАЭС

Список литературы

1. Программно-технические комплексы виброакустической диагностики РУ ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.П. Матисов, О.В. Овчаров и др. // Вопросы атом. науки и техн. Сер. Физ. ядер. реакторов. 2002. Вып. 3. С. 37–45.
2. Составные и перспективы применения систем оперативной диагностики для поддержания безопасности энергоблоков с ВВЭР / Г.В. Аркадов, А.В. Воронков, Н.Н. Давиденко и др. // Сб. докл. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 2-я Международная научно-техническая конференция, Подольск, 19–23 ноября, 2001. Т. 3. С. 255–259.
3. Булакин В.В., Гусев Д.Ф., Павелко В.И. Исследования характеристик вибродиагностики ВВЭР-1000 в эксплуатационных условиях // Атомная энергия. 1995. Т. 79. Вып. 5. С. 343–349.
4. Интерпретация нейтронно-шумовых экспериментов на реакторе ВВЭР-1000 / И.Е. Лазаревская, С.А. Морозов, Л.А. Соколов, Д.М. Шенцов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 1996. № 2. С. 40.
5. Амикин Г.Г., Гусев Д.Ф., Павелко В.И. Физическая интерпретация нейтронно-шумовых образов ВВЭР // Атомная энергия. 1997. Т. 82. Вып. 4. С. 271–277.
6. Гусев Д.Ф., Павелко В.И. Шумовые методы диагностики ВВЭР // Атомная энергия. 1997. Т. 82. Вып. 4. С. 264–271.
7. Основные спектральные характеристики виброакустического состояния РУ ВВЭР-1000 / Г.В. Аркадов, В.П. Матисов, О.В. Овчаров и др. // Вопросы атом. науки и техн. Сер. Физика ядерных реакторов. 2002. Вып. 3. С. 46–52.
8. Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. The experimental definition of the acoustic standing waves series shapes, formed in the coolant of the primary circuit of VVER-440 type reactor // Prog. Nucl. Energy. 1995. Vol. 29. N 3/4 P. 153–170.

Отечественная СВШД

9.1 Общие сведения

Начиная с 2003 г., новые блоки АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000, как отечественные, так и зарубежные, оснащаются СВШД, которые включены в проект реакторной установки. Разработка СВШД проведена ЗАО «Диапром» совместно с ГП ВНИИАЭС [1]. Созданная СВШД позволяет выявлять на ранней стадии и прогнозировать динамику следующих аномалий:

аномальные вибрации ВКУ и ТВС обусловленные: износом контактных поверхностей виброгасителей в нижних узлах крепления шахты; непроектной деформацией упругих трубчатых сегментов шахты; превышением проектных зазоров по разделителю потока, повышенными пульсациями давления ТН; непроектными значениями обтекательного и поканального расхода ТН; всплывшем ТВС

изменение жесткостных характеристик опор корпуса реактора ПГ, ГЦН

непроектные температурные перемещения корпуса реактора ПГ, ГЦН и трубопроводов

СВШД представляет собой автоматизированную локальную информационно-измерительную систему, состоящую из измерительных каналов и программно-технических средств. В основу построения ПТК СВШД положено использование новейших средств измерительной и вычислительной техники: преобразователей различных типов, программируемых контроллеров в каналах измерения и цифровой обработки информации, промышленных компьютеров для управления измерениями, обработки и анализа информации.

По сравнению с другими подобными системами диагностики СВШД имеет существенные особенности. Это в первую очередь

относится к шумовым компонентам сигналов датчиков различной физической природы. Например, размах флуктуаций шумов внутризонных нейтронных датчиков составляет величину 10^{-9} — 10^{-12} А, что требует качественной аналоговой обработки: использования прецизионных измерительных усилителей и высокочастотных фильтров, гальванического разделения входных и выходных сигналов, применения 16-разрядных АЦП для синхронной оцифровки всего частотного диапазона. Основные технические характеристики ПТК СВШД приведены ниже:

Частотный диапазон	. (0,1—200) Гц и (0,1—50) Гц
Режим работы	 Периодический
Число входных сигналов	 До 80
Длина одной реализации	 До 65 тысяч отсчетов
Результат анализа	. Частные и обобщенные диаграммы, спектральные характеристики, тренды, диагностические признаки.

В состав технических средств СВШД входят пять типов аналоговых измерительных каналов: ДАП, ДОП, ДПД, ИК, ДПЗ. Как показывает опыт предыдущих поколений зарубежных СВШК,

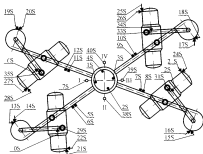


Рис. 9.1. Размещение ДАП, ДОП, ИК и ДПД на РУ ВВЗР-1000.
Обозначения: 15—45 — ДАП; 55—125 — ДПД; 135—345 — ДОП; 375—405 — ИК

особого внимания требуют каналы измерения вне- и внутризонного нейтронного шума. Флуктуации сигналов штатных ДПЗ в СВЩД могут поставляться двумя способами. Современные варианты системы внутриреакторного контроля (СВРК) имеют функцию выделения и усиления флуктуирующего компонента сигнала ДПЗ. В этом простом случае данные сигналы поставляются в СВЩД по специально организованной связи с СВРК. Проектом предусматривается, что в одну многоканальную запись сигналов СВЩД может быть поставлено 14 сигналов ДПЗ (сигналы двух КНИ). Далее, специальным коммутатором для следующей записи может быть выбрана следующая пара сигналов ДПЗ и т.д.

Если СВЩД поставляется на уже функционирующий блок с ВВЭР-1000, то штатные сигналы ДПЗ обрабатываются собственным блоком выделения флуктуирующего компонента ДПЗ в составе СВЩД.

Аналогичная картина наблюдается с сигналами ионизационных камер. В современных проектах аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) заложена функция выделения флуктуирующего компонента из частотно-модулированного сигнала ИК. Для этого предусмотрена связь СВЩД с АКНП. Если же пользователь СВЩД может организовать собственные каналы измерения внезонного нейтронного шума (если у него есть свободные измерительные каналы для установки шумовых ионизационных камер), то в СВЩД предусмотрены собственные каналы для его обработки.

Размещение ДАП, ДОП, ИК и ДПД на РУ ВВЭР-1000 представлено на рис. 9.1. На рис. 9.2, изображена структурная схема ПТК СВЩД. Ниже приведен состав технических средств ПТК СВЩД.

Измеритель абсолютных перемещений	4
Датчик абсолютного перемещения	4
Электронный блок управления ДАП	1
Измеритель перемещений 16-канальный программируемый	2
Датчик относительного перемещения	24
Усилитель несущей частоты	3
Блок калибровки ДОП	1
Датчик пульсации давления	12
Усилитель несущей частоты	1
Блок приема сигналов ДПЗ, ИК	2
Сигнальный процессор	1
Главное вычислительное устройство (ГВУ)	1



Рис. 9.2 Структурная схема СВШД

Прошедшие предварительную подготовку сигналы измерительных каналов поступают на вход сигнального процессора на базе промышленного компьютера, который обеспечивает их фильтрацию в диапазоне частот (0,1–200) Гц или (0,1–50) Гц, одновременную регистрацию до 80 сигналов датчиков, оцифровку и хранение в базе данных временных реализаций. Из сигнального процессора данные передаются по локальной сети в главное вычислительное устройство системы на базе промышленного компьютера Compaq PCI. В ГВУ осуществляется обработка временных реализаций, заполнение базы данных диагностических признаков и выдача диагностической информации пользователю.

Существенное отличие подхода к алгоритмам диагностирования примененное в данной СВШД от алгоритмов, реализованных в зарубежных системах аналогичного назначения, например в системе SÜS, состоит в автоматическом выделении диагностических признаков. Основой для проведения диагностирования служит сценарий, который определяет:

- вид диагностируемого оборудования РУ
- совокупность измерительных каналов, необходимых для проведения диагностирования именно данного элемента РУ
- параметры измерения (объем выборки, частота дискретизации и т.д.)
- алгоритмы обработки;
- вид и объем диагностических сообщений

При этом выделяется не одно множество резонансов, а несколько – каждое из них соответствует определенному реакторному эф

фекту. Такой подход реализуется следующим последовательностью действий

эксперты по реакторным шумам, проводя исследования реальных случайных процессов при заданной конфигурации датчиков, составляют алгоритмы выделения различных реакторных эффектов;

эти алгоритмы реализуются экспертами в виде сценариев — последовательности действий над множеством зарегистрированных сигналов датчиков,

сценарии, являясь частью методического обеспечения СВЩД всякий раз применяются к каждой новой многоканальной записи процессов, полученной в результате периодического виброконтроля реакторной установки

Таким образом, персонал, эксплуатирующий систему диагностики, освобождается от необходимости выбора параметров вычислительных процедур множества сигналов, от последующего выделения вручную некоторого множества резонансов. Вся эта сложная работа уже сделана экспертами по оцениванию спектральных характеристик и реакторной виброшумовой диагностике. Основное преимущество автоматического выделения резонансов состоит в том, что при таком подходе аномалии в состоянии оборудования могут быть выявлены на самой ранней стадии их зарождения, когда они еще не заметны. При ручном выделении резонансов вследствие их большого количества в одной спектральной характеристике, а также из-за возможного изменения их положения, существует опасность пропуска аномалий.

Стартовая библиотека сценариев состоит из пяти обобщенных сценариев и может пополняться в процессе эксплуатации СВЩД вибрации основного оборудования ГЦК (ПГ ГЦН U образный трубопровод);

вибрации корпуса РУ

вибрации шахты активной зоны;

вынуждающие вибрации силы (АСВ пульсации ТН)

вибрации ТВС

В результате выполнения сценариев формируется диагностическая информация которую можно условно разделить на три уровня:

спектральные характеристики вибросигналов (АСПМ ВСПМ

фазы, когерентности и т.п., а также значения частот соответствующие определенному реакторному эффекту)

трендовые характеристики диагностических признаков

частные и обобщенные тексты диагнозов, полученные автоматически по той или иной совокупности спектральных признаков

В системном и прикладном программном обеспечении (ПО) СВЩД реализованы следующие функции:

управление измерениями в том числе калибровка и балансировка измерительных каналов ДАП ДОП

предварительная подготовка сигналов датчиков

регистрация данных

хранение и архивизация данных;

автоматический анализ измерений.

Диагностирование основная процедура функционирования ПО, включает в себя:

подготовку и проведение измерений

сохранение результатов измерений в базе данных временных реализаций;

обработку результатов измерений в соответствии со сценариями;

сохранение результатов выполнения сценариев в базе данных диагностических признаков;

анализ трендов спектральных признаков за кампанию и/или срок эксплуатации;

отображение результатов

Функциональная схема ПО СВЩД приведена на рис. 9.3. В состав ПО СВЩД входит:

ПО настройки измерительных трактов, контроля качества процессов, их записи и архивизации на долговременный носитель информации;

БД результатов измерения (многоканальных временных реализаций);

ПО подготовки выполнения сценариев и их вычислительная реализация;

БД вибродиагностических признаков,

ПО визуализации результатов работы сценариев

Диагностирование может проводиться как отдельно для заданного вида оборудования (выборочное диагностирование) путем измерения и последующего выполнения определенного сценария так и для

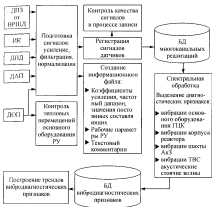


Рис. 9.3 Функциональная схема ПО СВШД

всех видов оборудования, диагностирование которых предусмотрено в СВШД (полное диагностирование), а также последовательным автоматическим выполнением всех заложенных в СВШД сценариев.

Кроме того ПО СВШД обеспечивает возможность проведения специальных измерений. Результаты специальных измерений не предназначены для обслуживания какого-либо сценария и используются как исходные данные для исследовательских работ с использованием ПО не входящего в состав СВШД. Результатом выполнения специального измерения должны являться временные реализации входных сигналов, записанные в особый раздел БД временных реализаций.

Конструктивно СВШД выполнена в двух стойках-шкафах, схематично представленных на рис. 9.4, 9.5. СВШД построена с учетом опыта эксплуатации зарубежных систем. По табл. 9.1 можно

Таблица 9.1 Сравнение систем диагностики СВЩД (Россия) и SUS (Германия)

Характеристика	СВЩД	SUS (Siemens)
Программное и алгоритмическое обеспечение	Вибромониторинг и диагностирование с выходом на конкретный диагноз в автоматическом режиме	Только вибромониторинг (оценки за отклонения в резонансах спектральных характеристик от эталонных значений) в ручном режиме
Математическое обеспечение	Расширенные возможности спектрально-корреляционного анализа	Оценка не более чем 20 км. имых спектральных характеристик
Сервис	Автоматическое выделение резонансов в спектральных характеристиках, что не требует высокой квалификации персонала	Требуется квалифицированный пользователь для ручного выделения резонансов
Каналы измерения нейтронного шума	Дополнительные внешние (НК) и внутренние (ДПЗ) каналы, что позволяет контролировать ВКУ и ТВС реактора	Отсутствуют внешние и внутренние каналы измерения нейтронного шума
Датчики абсолютных перемещений	Частотный диапазон 2–200 Гц без дополнительного оборудования для полного нивелира частот	Частотный диапазон 4–200 Гц с дополнительным оборудованием (корректирующий усилитель)
Число каналов	80 с возможностью наращивания до 160 в данных приборах приборного шкафа	48 без возможности наращивания
Унификация	Унифицированные технические средства в каналах перемещений и пульсаций давления	Каналы виброперемещений и пульсаций давления не унифицированы

сравнить характеристики СВЩД и системы контроля вибрации фирмы Siemens.

9.2 Сценарий вибродиагностики как элемент методического обеспечения СВЩД

Сценарии — макрооперация, составленная группой экспертов для выявления диагностических признаков по конкретным реак

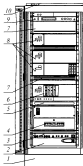


Рис. 9.4. Информационно-измерительное устройство, шкаф 1:

1 — шкаф монтажный; 2 — источник бесперебойного питания; 3 — блок силового питания; 4 — сигнальный процессор; 5 — кабельная панель ввода кабелей Ethernet; 6 — блок измерителя абсолютных перемещений; 7 — блок вентиляционного охлаждения; 8 — блоки усилителя несущей частоты измерителя промышленных; 9 — блок контроля температуры внутри шкафа; 10 — панель индикации

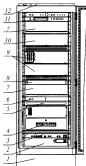


Рис. 9.5. Информационно-измерительное устройство, шкаф 2:

1 — шкаф монтажный; 2 — источник бесперебойного питания; 3 — блок силового питания; 4 — сигнальный процессор; 5 — кабельная панель ввода кабелей Ethernet; 6 — устройство преобразования сигналов Ethernet; 7 — блок вентиляционного охлаждения; 8 — устройство ввода-вывода; 9 — блок приема сигналов ДПЗ; 10 — блок приема сигналов ИК; 11 — блок контроля температуры внутри шкафа; 12 — панель индикации

торным эффектам. Сценарии — неуправляемая со стороны эксплуатации АЭС макрооперация. Число сценариев не ограничивается и может непрерывно пополняться, хотя некоторая иерархия в их множестве должна быть. Например приоритетную роль должны играть сценарии, выявляющие важные с точки зрения безопасности эксплуатации АЭС диагностические признаки.

Сценарий должен автоматически ставить как бинарный диагноз

«норма — не норма» в текущий момент времени, так и предоставлять информацию по прогнозированию технического состояния оборудования перед выходом в ППР.

Любой сценарий СВШД строится при помощи элементарных операций (ЭО). Под элементарностью понимается смысловая и функциональная завершенность того или иного вычислительного блока а совсем не простота выполняемых операций. Например, элементарной операцией может быть назначен МАР-анализ или целая процедура автоматической декомпозиции четырех сигналов ДАП по типам колебаний корпуса реактора. Чаще всего употребляемые ЭО — фильтрация, оценка АСПМ функции когерентности, фазы и выделение частот резонансов той или иной функции. Наряду с этим, среди элементарных операций существуют действительно простые вычислительные блоки: оценка математического ожидания, дисперсии, центрирование процесса, исключение тренда и т.д. Отдельную группу ЭО составляют операции построения семейств графиков и различных таблиц, в которые сводятся результаты диагностирования.

Сценарий описывается структурной схемой, состоящей только из ЭО выполняемых в определенной последовательности. Поэтому ЭО согласованы по входам и выходам. Библиотеку ЭО очевидно, можно наращивать.

Если конечная цель построения сценария — не слишком простейший диагноз, то два эксперта наверняка составят два разных сценария. В этом нет никакого противоречия. Один шумовой источник, проявляясь в разных каналах СВШД может быть выявлен разными способами. Важно, чтобы прежде эксперты поработали с записями шумов именно этого реактора, хотя не исключаются и общереакторные сценарии, построенные из общих соображений и годные для диагностики любых реакторов данного типа. В любом случае при введении данного сценария на конкретную РУ существует множество настроечных параметров в каждой ЭО с помощью которых сценарий можно довести до приемлемых кондиций.

Естественного развития библиотеки сценариев можно достичь при вводе нового блока АЭС в эксплуатацию. Основу библиотеки составили бы общереакторные сценарии и сценарии, основанные на опыте диагностирования подобных блоков. Они бы

модифицировались к ним бы добавлялись новые сценарии в соответствии с ходом пусконаладочных работ по следующим этапам: холодная и горячая обкатка, физический пуск, базисные измерения, первый выход на проектные параметры штатная эксплуатация.

Перечисленные этапы составляют единую технологическую цепочку, по мере прохождения которой должен расти объем априорных вибродиагностических знаний о данной РУ. Файлы сценариев формируются с помощью специального ПО.

Сценарии состояются из следующих элементарных операций

1 Чтение входных процессов и параметров измерений (K_d — коэффициент преобразования датчика; K_y — коэффициент усиления тракта; I_d — постоянная составляющая сигнала датчика; F_d — частота дискретизации, Гц; диапазон частот ($F - F_2$); Γ — число точек в одном канале).

2. Предварительная обработка, центрирование, исключение линейного тренда, прореживание, линейные преобразования процесса, приведение к (0,1)-процессу (нулевое математическое ожидание и единичная дисперсия).

3. Фильтрация (НЧ, ВЧ, полосовая).

4. Оценка корреляционных функций (АКФ, ВКФ).

5. Оценка автоспектральной плотности (квадратичная, линейная).

6. Оценка взаимных спектральных характеристик: модуль, фаза, ВСПМ, когерентность, передаточная функция.

7. Операции с множеством частот экстремумов спектральных функций (далее с множествами маркеров):

выделение частот локальных максимумов или минимумов

объединение множеств маркеров

пересечение множеств маркеров

разность множеств маркеров

выделение гармонических рядов из множества маркеров

выделение субгармонических рядов из множества маркеров;

выделение маркеров, где заданная функция принимает заданное значение (например, где фаза принимает значение 0 или π).

8. Автоматическая декомпозиция типов колебаний корпуса по следующим стандартным типам: маятниковый однонаправленный маятниковый стохастический, круговой, вертикальный.

9. Формирование протоколов виброконтроля с таблицами и графическими иллюстрациями

Последняя операция предназначена для подготовки графической табличной и текстовой информации отображающей итоги применения конкретного сценария по единственной многоканальной записи, т.е. без предыстории без отображения трендовых характеристик.

9.3 Пример обработки сигналов СВЩД по одному из сценариев

Описываемый ниже сценарий «Колебания корпуса реактора» (рис. 9.6) построен на четырех сигналах ДАП — A01, A02, A03, A04. Первые операции сценария — вычисления всех АСПМ (A1, A2, A3, A4), функций когерентностей (G12, G23, G34, G41) и фаз (θ_{12} , θ_{23} , θ_{34} , θ_{41}) для всех возможных пар сигналов соседних ДАП. Все параметры оценивания перечисленных спектральных характеристик оптимальны, зафиксированы и в дополнительной настройке пользователем СВЩД не нуждаются. Далее по четырем функциям когерентности выделяются частоты (в сценарии они называются маркерами) их резонансов (R12, R23, R34, R41). Выделяются частоты только значимых резонансов, у которых величина когерентности более 0,3. Для каждой пары соседних датчиков из этих частот выделяют подмножества частот, для которых фаза равна нулю (θ_{00}), $+\pi/2$ (θ_{90}), $-\pi/2$ (θ_{-90}) и π (θ_{180}). Далее теоретико-множественными операциями — пересечениями и объединениями — образуются следующие множества частот колебаний корпуса реактора. $R_{\text{вер}}$ — вертикальные колебаний; $R_{\text{круг+}}$, $R_{\text{круг-}}$ — круговые колебания против часовой стрелки и по ней; $R_{\text{маятн}}$ — маятниковые колебания.

Частоты вертикальных колебаний корпуса получаются как пересечение всех множеств частот, на которых фазы равны нулю, круговые — как пересечение всех множеств частот, на которых фазы равны $\pi/2$, маятниковые — как объединение множеств частот, на которых фазы принимают значения 0 и π . Следует отметить, что при образовании множества частот маятниковых колебаний корпуса учитываются всевозможные комбинации синфазных и противофазных колебаний удовлетворяющие так называемому правилу баланса фаз.

Таблица 9.1. Интегральный уровень вибраций корпуса реактора (сравнение дисперсии сигнала ДАПИ в полосе частот (0—40) Гц с диагностическими порогом)

Имя файла функции	Полоса частот, Гц	Интеграл функции	Значение порогов для	Диагноз по сценарию файл: veev1.xls
файл: AA01	0 00 — 40 00	0 8073	ЦА: 0,5 Ц: 0,5999 D: 0 DA: 0	Аномальные случайные колебания А1

Таблица 9.2. Вынужденные колебания корпуса реактора на частотах АСВ (значения сигнала ДАПИ на частотах АСВ в сравнении с диагностическими порогом)

Значения маркеров Гц, файл: I234	Полоса частот, Гц	Значение функции на маркерах, файл: AA01	Значение порогов для функций	Диагноз по сценарию файл: veev1.xls
0 8125	0 00 — 1 00	0 0151	ЦА: 0,5 DA: 0 0006	Внимание к колебаниям корпуса на частотах АСВ
6 6528	1 00 — 7 00	0 0123	Ц: 0 5999 DA: 0	Норма

Таблица 9.4. Собственные круговые колебания корпуса реактора по часовой стрелке и против нее (значения АСПМ сигнала ДАПИ на частотах собственных круговых колебаний в сравнении с диагностическими порогом)

Значения маркеров Гц, файл: ring+	Полоса частот, Гц	Значение функции на маркерах, файл: AA02	Значение порогов для функций	Диагнозы по сценарию файл: veev1.xls
	0 00 — 4 00			
4,8125	4 00 — 18 00	1 1526	DA: 0 090 DA: 0	Аномальные колебания на частоте ring+
Значения маркеров Гц, файл: ring	Полоса частот, Гц	Значение функции на маркерах, файл: AA02	Значение порогов для функций	Диагнозы по сценарию файл: veev1.xls
	0 00 — 4 00			
5,875	4 00 — 18 00	0 746	ЦА: 0,0900 DA: 0,0599	Внимание к колебаниям на частоте ring+

Чтобы контролировать вынужденные колебания корпуса реактора, в данный сценарий введено множество частот АСВ и гармоник оборотной частоты ГЦН R_{ACB} . Оно получено по сигналам ДПД в другом сценарии под названием «АСВ и другие вынуждающие вибрации силы».

После получения оценок спектральных функций и частот реакторных эффектов сценарий автоматически выдает таблицы, в которых диагностические признаки сравниваются с заранее определенными порогами, и текстовые диагнозы.

В качестве диагностического признака может выступать любой интеграл от любой спектральной функции в любом диапазоне частот, значения любых спектральных характеристик на частотах любых выделенных эффектов. Имеется возможность по каждому диагностическому признаку задать два верхних и два нижних порога. Таким образом, можно организовать предупредительные и аварийные сообщения. Табл. 9.2 — 9.4 представляют фрагмент результатов рассматриваемого сценария по сигналам ДАП блока I КоАЭС.

В табл. 9.4—9.6 преднамеренно выбраны неправдоподобные диагностические пороги, чтобы вызвать различные сообщения сценария об аномальных вибрациях корпуса. Вслед за таблицами сценарий выдает семейства спектральных характеристик в двух- и трехмерном отображении иллюстрирующие тот или иной эффект (рис. 9.7).

С этой целью на графики накладываются отметки соответствующих частот. Таким способом графически иллюстрируются выделенные реакторные эффекты (см. рис. 9.7). Подчеркнем особо, что все операции сценария, в том числе выдача таблиц и графиков, выполняются автоматически, без участия пользователя.

Роль пользователя будет усиливаться по мере накопления спектральных образов. В результате многократного применения одного и того же сценария в различных разделах БД СВШД будут накапливаться однотипные спектральные оценки и множества частот однотипных реакторных эффектов, выделенных на различных этапах эксплуатации РУ. Для исследования трендовых характеристик накопленных спектральных образов в СВШД предусмотрен специальный инструментарий. Он дает возможность пользователю по множеству накопленных функций в ручном и полуавтоматическом режиме выделять те или иные тренды (рис. 9.8—9.9).

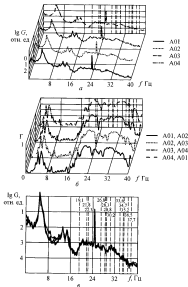


Рис. 9.7. АСПМ сигналов четырех ДАП (а), функции когерентности сигналов ДАП с отметками всех выделенных частот (б) и АСПМ сигналов ДАП с отметками частот вертикальных колебаний корпуса реактора (в)

Рис. 9.8. Отображенная часть (маркеры) одного реакторного эффекта после 5-кратного применения сдвига

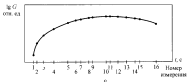
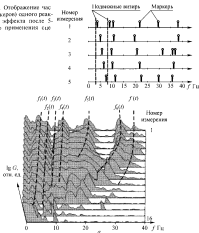


Рис. 9.9. Семейство АСПМ, отображаемое для выделения триады (а), и триады (б) семейства на полосу маломощное после 16-кратного преобразования сигнала

9.4 Пример функционирования СВЩД в режиме контроля перемещений основного оборудования

Разогрев и расколаживание ГЦК при пусках и остановках блока вызывают перемещения основного оборудования и трубопроводов вследствие изменения температуры ТН. Подобные перемещения не должны ограничиваться ни состоянием подвижных опор ГЦН или ПГ, ни возможными препятствиями на их пути, ни геометрическими отклонениями от проекта размещения оборудования (негоризонтальность трубопроводов, невертикальность осей ГЦН и ПГ и т.д.). В противном случае возникают дополнительные напряжения в металле ГЦК, которые могут повлиять как на целостность контура, так и на остаточный ресурс оборудования.

Контроль перемещений оборудования строго говоря не являлся задачей вибродиагностики. В СВЩД эта задача решается попутно, хотя процесс разогрева (расколаживания) ГЦК может существенно образом повлиять на вибросостояние компонентов РУ. Датчики относительных перемещений, установленные на основном оборудовании петлей (рис. 9.10), двухфункциональны: как вибродатчики в стационарных режимах функционирования блока они чувствительны к микроперемещениям, а в динамических режимах они способны регистрировать перемещения в пределах до 100 мм.

В любой момент разогрева или расколаживания ГЦК эксплуатационным персоналом должен знать, что данный процесс проводится в соответствии с проектными требованиями. Кроме того по его завершению необходимо иметь заключение о том, что температурные изменения геометрии контура находятся в допустимых пределах.

Для этого СВЩД в режиме реального времени предоставляет широкие возможности по отображению результатов измерения перемещений. Они могут быть при

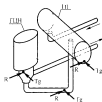


Рис. 9.10. Расколаживание шести ДОП на оборудовании одной петли

ведены как функции времени, температуры ТН или в виде траектории перемещения точки, в которой размещены чувствительные элементы ДОП (рис. 9.11—9.13). Оценивание траектории возможно потому, что пара датчиков относительных перемещений на одной единице оборудования устанавливается в горизонтальной плоскости под прямым углом.

По траектории удобно выявлять немонотонное или скачкообразное перемещение оборудования, возникающее при изношенных опорах. Например, по виду зависимостей перемещений в тангенциальном и радиальном направлениях (см. рис. 9.11, 9.12) трудно предположить, что соответствующая траектория немонотонна и имеет точки возврата.

С помощью наборного поля пользователь может выбрать любое из следующих типов отображения:

отображение перемещения какой-либо одной единицы оборудования — один из четырех ГЦН или один из четырех ПГ или один из четырех U образных трубопроводов

отображение перемещений группы однотипного оборудования — все четыре ГЦН или ПГ или U образных трубопровода (рис. 9.14)

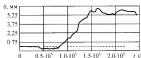


Рис. 9.11. Перемещения ПГ1 в радиальном направлении как функция времени

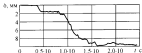


Рис. 9.12. Перемещения ПГ1 в тангенциальном направлении как функция времени

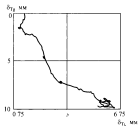


Рис. 9.13 Траектория ПГ1, полученная по кривым рис. 9.11, 9.12

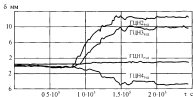


Рис. 9.14. Отображение перемещения группы относительного оборудования

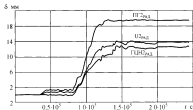


Рис. 9.15. Отображение перемещений оборудования одной пети

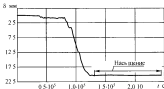


Рис. 9.16. Функция перемещения ГЦН с фрагментом намотки

группы разнотипного оборудования какой либо одной из четырех петель (рис. 9.13)

отображение всех 24 измеряемых перемещений.

СВШД в автоматическом режиме отыскивает участки постоянства функции перемещения от времени всех измеряемых сигналов ДОП (рис. 9.16). Пользователю в реальном масштабе времени предоставляется возможность сравнивать текущие перемещения с уже состоявшимися, и находящимися в архиве измерениями. Для этого необходимо вызвать соответствующий файл, и графики архивных перемещений устанавливаются в фоновый режим

После завершения динамического режима СВШД выдает таблицу, в которой выделены максимальное и минимальное перемещения по каждому сигналу, максимальное и минимальное значения для трех расстояний между ГЦН – ПГ и U-образным трубопроводом каждой петли (ГЦН – ПГ, ПГ – U, U – ГЦН), а также результаты сравнения с пороговыми значениями*

* Программно-технический комплекс системы вибродиагностики РУ ВВЭР / Г.В. Архалов, В.П. Матвеев, О.В. Огиаров и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физ. ядер. реакторов. 2002. Вып. 3. С. 37–45

Экспериментальные виброшумовые исследования на РУ типа ВВЭР-440

10.1 Измерение воканальной скорости теплоносителя по флуктуациям сигналов ДПЗ на АЭС Богуньце

На блоке II АЭС Богуньце (Словакия) на 100%-ном уровне мощности реактора были проведены синхронные записи шумовых сигналов нескольких сборок ДПЗ [1]. К этим реализациям внутризонного нейтронного шума были применены спектральные методы, приведенные в гл. 4.

Как продемонстрировано в предыдущих разделах в авто- и взаимных спектральных характеристиках сигналов ДПЗ присутствуют эффекты вибраций ВКУ ТВС и акустических стоячих волн дашения теплоносителя. В спектрах они присутствуют в виде резонансов, которые искажают *zink*-структуры. Априорное знание свойств вибраций и АСВ позволяет выбрать такой рабочий диапазон частот, где их влияние минимально. Для ВВЭР-440 он ограничен сверху мощным низкочастотным резонансом АСВ с центральной частотой 8,28 Гц (при номинальных режимных параметрах РУ), снизу — частотой вибраций АРК. В зависимости от глубины их погружения в активную зону данная частота колеблется в пределах (0,8—1,5) Гц (рис. 10.1). Эффективная ширина резонанса первой корпусной АСВ равна примерно 2 Гц, поэтому имеет смысл рассматривать *zink* структуры в диапазоне частот от 2—7 Гц.

Из оценок основных спектральных функции шумов ДПЗ (см. рис. 10.1–10.2) видно, что их свойства согласуются с предсказаниями формальной модели глобального зашумления: *zink*-структуры присутствуют во взаимных спектральных плотностях и функциях когерентности, а их периодичность зависит от расстояния между двумя ДПЗ. Глобальный компонент становится соизмеримым с локальным именно в рабочем диапазоне час-

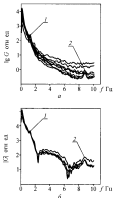


Рис. 10.1. АСПМ (а) сигналов семи ДПЗ, установленных в одном ТВС и модуль ВСПМ для пар 1—4, 2—3, 3—6, 4—7 (б);

1 — резонанс обусловленный вибрациями строения СУЗ, 2 — резонанс АСВ

от (2,5—5,0) Гц, так как здесь функции когерентности на локальных минимумах очень близки к нулю, т.е. достигается идеальная ситуация ($k(f) = 1$) для выделения параметра τ_0 по функции когерентности.

Кроме функции когерентности применяется новая функция $|\psi_{T-1}(f)|$, с помощью которой τ_0 оценивается с меньшей погрешностью, чем с помощью функции когерентности (ср. рис. 10.3 и рис. 10.2, в в точке $1/\tau_0$).

Все спектральные оценки группируются в семейства по признаку равенства расстояний между двумя ДПЗ (табл. 10.1)

При абстрагировании от нейтронно-температурных процессов, происходящих в АкЗ реактора, спектральные характеристики,

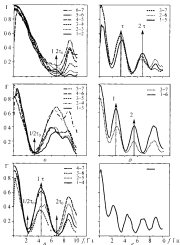


Рис. 10.2. Семейства функций коррентности: при расстоянии между дат невин Δz , равном 385 мм (а), 770 (б), 1155 (в), 1540 (г), 1925 (д), 2310 (е)

принадлежащие одной строке таблицы, должны тождественно совпадать. Однако между различными парами ДПЗ действуют разные источники нейтронного шума, которые переносятся потоком теплоносителя.

Пара 1–2 описывает перенос входных флуктуации в паре 2–3 этот эффект ослабевает, но дополнительно начинают переноситься с потоком теплоносителя и новые шумовые источники порожденные энерговыделением из твэлов в поток на данном про

Таблица 10.1 Шесть семейств, соответствующих различным расстояниям между двумя ДПЗ

Расстояние между ДПЗ, мм	Порядковость с номера двух ДПЗ в одной паре					
	1 2	2 3	3 4	4 5	5 6	6 7
305						
610						
915						
1220						
1525						
1830						

странственном отрезке длиной 305 мм. В каждой новой паре ДПЗ появляются новые источники и затухают старые. Тем не менее каждое семейство функций когерентности (см. рис. 10.2) за редким исключением представляет однородную в статистическом смысле группу функций. Это означает, что, хотя разные источники нейтрального шума изменяют свою интенсивность по мере движения с потоком, их скорость неизменна.

Искомый параметр τ_d можно получить из взаимных характеристик сигналов двух ДПЗ, различных особенностей одной характеристики и различных пар сигналов, т.е. единственная синхронная запись сигналов семи ДПЗ одного КНИ может породить не сколько десятков оценок одной и той же скорости. Например

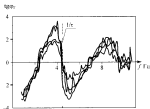


Рис. 10.3. Функции $r(\tau)$ для пар ДПЗ 1 4 2 3 6 4 7

Таблица 10.2 Семейства оценок скорости теплоносителя

Номера пар ДПЗ	Спектральные особенности	Во фреймвиз	Причины выбросов	Средняя скорость, м/с
1–3, 2–3 3–4, 4–5 5–6, 6–7	$1/(2\tau_0)$	Выбраковываются все семейство	Частота $1/(2\tau_0)$ находится близка частоты АСВ	
1–3, 2–4 3–5, 4–6 5–7	$1/(2\tau_0), 1/\tau_0$	Пара 1–3 $1/\tau_0$	Частота $1/\tau_0$ находится близка частоты АСВ	3.88 ± 0.11
1–4, 2–5 3–6, 4–7	$1/(2\tau_0), 1/\tau_0, 3/(2\tau_0)$	Пара 1–4, $1/(2\tau_0)$	Частота $1/(2\tau_0)$ вышла за нижний предел рабочего диапазона частот	3.84 ± 0.04
1–5, 2–6 3–7	$1/(2\tau_0), 1/\tau_0, 3/(2\tau_0), 2/\tau_0$	Пара 1–5 $1/(2\tau_0)$	То же	3.85 ± 0.04
1–6, 2–7	$1/(2\tau_0), 1/\tau_0, 3/(2\tau_0), 2/\tau_0$	Пара 1–6 $1/(2\tau_0)$	То же	3.86 ± 0.10
1–7	$1/(2\tau_0), 1/\tau_0, 3/(2\tau_0), 2/\tau_0$	Выбраковываются все семейство		

только число всевозможных пар сигналов ДПЗ равно 21, число спектральных особенностей в рабочем диапазоне частот в одной функции когерентности может достигать пяти. Такой выборки достаточно и чтобы отбраковать систематические погрешности (в том числе, и упомянутые погрешности метода) и уменьшить случайную составляющую погрешности. Вначале необходимо выделить из всего множества оценок компактную группу с близкими средними и минимальными дисперсиями. Затем измерения с большой погрешностью, не принадлежащие компактной группе выбраковываются, а по оставшимся элементам проводится усреднение (табл. 10.2).

Как следует из рис. 10.2, в любом семействе особое положение занимают пары ДПЗ1–ДПЗ2, ДПЗ1–ДПЗ3, ..., ДПЗ1–ДПЗ7. В них доминируют эффекты переноса входных источников флукутаций, скорость которых не совпадает со скоростью теплоносителя. Помимо этих функций отбракованы первые *zink*-минимум

мы, начиная с третьего семейства и далее – а также частота $\omega_{\text{пк}}$ максимума во втором семействе (см. табл. 10.2).

Эти особенности вышли за пределы рабочего диапазона частот. Оставшиеся оценки отличаются малым разбросом – и после усреднения случайная составляющая относительной погрешности измерения скорости ТН оценивается в 1%: $3,85 \pm 0,035$ м/с.

Таким образом, при оценке скорости ТН через РК ВВЭР-440 спектральными методами на номинальных параметрах РУ по сигналам семи ДПЗ, находящихся в одной РК, необходимо придерживаться следующих правил, найденных эмпирически:

верхняя частота спектральной особенности не должна превосходить частоту 6,5 Гц, в противном случае на нее будет оказывать влияние низкочастотный резонанс АСВ с центральной частотой 8,28 Гц;

нижняя частота спектральной особенности не должна быть менее 2,5 Гц, в противном случае возрастает систематическая погрешность вследствие неадекватности модели глобального зашумления, вибрационных эффектов, роста глобального компонента;

следует не принимать во внимание все пары сигналов, в которых присутствует ДПЗ1.

10.2 Неитронно-шумовая оценка траектории шахты активной зоны ВВЭР-440

Наряду с традиционными параметрами вибродиагностики, такими, как амплитуда и частота резонанса, в качестве диагностического признака используется траектория движения какого-либо элемента оборудования РУ при ее вибрации. Обычно траектории оценивают по фазовым соотношениям сигналов нескольких датчиков. Этот способ называется модальным анализом. Оценка фазы характеризует некоторый временной интервал ($0 \dots T$), на котором она получена, т.е. в результате модального анализа получаются некоторые усредненные, а не текущие (мгновенные) траектории. Поэтому малые изменения траектории модальный анализ выявить не позволяет, так как вклад в изменение оценок углов будет незначительным.

Для ранней диагностики ценнее получить траекторию как функцию времени. Причем, если исходные реализации вибросиг-

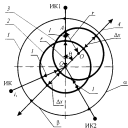


Рис. 10.4. Параметры, характеризующие отклонение шахты от равновесного вертикального положения:

1 — корпус реактора; 2 — шахта в равновесном положении; 3 — шахта в отклоненном положении; 4 — наибольшее перемещение шахты

налов на временном интервале $(0, T)$ состоит из N точек, то и функции, характеризующие траекторию также должны быть оценены на том же временном интервале и с тем числом точек.

Метод оценки траектории шахты по внезонным нейтронным шумам имеет следующую постановку [2]. Пусть в произвольный момент времени шахта отклонилась от вертикального равновесного положения на величину Δx в направлении угла θ (рис. 10.4). Пусть для определенности имеются три ионизационных камеры (точки r_1, r_2, r_3) с произвольными углами между ними: $\angle r_1 r_2 = \alpha$, $\angle r_1 r_3 = \beta$, которые отсчитываются от луча Ox_1 . Изменение тока первой ионизационной камеры пропорционально величине l_1 , второй — l_2 третьей — l_3 . По определению, неотрицательная величина Δx представляет собой максимальное отклонение шахты по всевозможным направлениям θ : $\Delta x = \max l(\theta)$. Очевидно, что траектория движения шахты описывается двумя функциями времени $\Delta x(t)$, $\theta(t)$ которые по своей сути, являются полярными координатами.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти функции $\Delta x(t)$, $\theta(t)$ по измеренным процессам $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ (точнее, по измеренным флуктуациям токов ИК, которые пропорциональны соответствующим отклонениям)

Для первой ИК (см. рис. 10.4) находим взаимосвязь между Δx и $\dot{\theta}$:

$$r_2^2 = (\Delta x)^2 + (r + l_1)^2 - 2\Delta x(r + l_1) \cos \theta \quad (10.1)$$

где r — радиус шахты (далее этот параметр исключится из системы уравнений). Аналогично находятся взаимосвязи Δx — θ и $\dot{l}_2$, Δx — θ и $\dot{l}_3$. Искомые функции $\Delta x(t)$, $\theta(t)$ являются решением экстремальной задачи по переопределенной системе нелинейных уравнений типа (10.1). Три визизационные камеры — минимальное число нейтронных датчиков, необходимое для решения задачи восстановления траектории. При кажущейся простоте постановки задачи конечный алгоритм имеет громоздкий вид вследствие поправок на многозначность обратных тригонометрических функций.

На рис. 10.5,а изображена простейшая круговая траектория, характеризующаяся координатами $\Delta x(t) = r \cos t$ и линейным углом $\theta(t)$.

Поскольку угол оценивается на интервале $(0 - 2\pi)$, то функция $\theta(t)$ представляет собой периодическую пилообразную кривую период которой t_0 равен времени полного оборота шахты (рис. 10.5,б). Если на каждом цикле колебаний траектория остается неизменной, то спектральная плотность функций $\Delta x(t)$ и $\theta(t)$ также однозначно характеризуют траекторию, как и исходные временные функции (рис. 10.5,в). АСПМ радиус-вектора Δx представляет собой δ -функцию на нулевой частоте, т. е. самый низкочастотный из возможных спектров. АСПМ $\theta(t)$ состоит из дискретного ряда гармоник n/t_0 , амплитуда которых спадает по закону $1/n$ (n — номер гармоники). На практике точно круговых траекторий не бывает поэтому нулевая гармоника функций $\Delta x(t)$

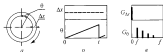


Рис. 10.5. Характеристика траектории при равномерном круговом вращении шахты: а — схема движения; б — зависимость угла траектории и радиус-вектора от времени; в — спектральные плотности функций угла и радиус-вектора

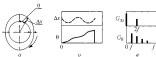


Рис. 10.6. Характеристики эллиптической траектории шашты: а — схема движения; б — зависимость угла траектории и радиус-вектора от времени; в — спектральные плотности функций угла и радиус-вектора

(или постоянная составляющая) может приниматься как крутой элемент разложения произвольной сложной траектории.

Любая некруговая траектория характеризуется нелинейной функцией угла, вследствие чего на ней возникают особые точки (точки экстремумов, перегибов, возвратов и т.д.), в которых ее последовательные производные обращаются в нуль либо терпят разрыв. Например, если шашта перемещается по эллиптической траектории (рис. 10.6) то новых экстремумов в функции угла не появляется, кривая по-прежнему монотонна, но появляются точки перегиба.

Теперь в АСПМ радиус-вектора помимо нулевой гармоники присутствует δ -функция на двойной оборотной частоте, в АСПМ угла по сравнению с предыдущим случаем увеличились гармоники на высоких частотах. Несложно сконструировать диагностические признаки на спектральном языке, интегрально характеризующие эллиптическую траекторию.

На рис. 10.7 изображен случай так называемой локальной петли. За относительно короткий временной интервал по сравнению с периодом колебаний шашты совершает малый цикл колебаний с возвратом в исходную точку. Понятно, что кратковременные осо-

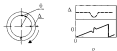


Рис. 10.7. Особенности траектории «локальная петля»: а — траектория; б — зависимость угла и радиус-вектора от времени

бенности на спектральном языке описываются высшими гармониками и определить их для любой локальной петли затруднительно. Локальные петли наблюдались при аномальных вибрациях шахты на блоке I АЭС Greifswald (ГДР) с ВВЭР-440.

В работе [3] сделан вывод о том, что локальные петли траектории возникают вследствие ударов внутри шпоночных соединений шахта-корпус при значительном износе шпонок. В качестве доказательства приводился экспериментальный факт совпадения угловых координат локальных петель траектории с угловыми координатами шпонок. В качестве признака локальной петли использовали только локальный минимум функции $\theta(t)$.

Как следует из рассмотренных примеров, выбор в пользу временного или спектрального описания траектории в каждом конкретном случае решается индивидуально: глобальный вид траектории лучше представлять на спектральном языке, особенности траектории (что важно для ранней диагностики) — на временном языке.

В реальности траектория шахты не воспроизводится от цикла к циклу, и всегда существуют побочные шумы, не связанные с вибрациями ВКУ. В частности, в нейтронных шумах присутствует широкополосный глобальный компонент.

На блоке I Кольской АЭС сигналы трех ИК исследовали совместно с другими сигналами системы СУС (датчики перемещений, пульсации давления). Установлено, что доминирующий резонанс в сигналах ИК и ДАП на частоте 4,9 Гц обусловлен колебаниями шахты совместно с корпусом реактора (рис. 10.8). Это мощное вибрационное явление значительно превосходит по своей амплитуде все другие источники внезонного нейтронного шума. На этой же частоте колебания корпуса также превосходят все другие вибрационные эффекты.

Тем не менее, предварительно сигналы трех ИК фильтровались полосо-

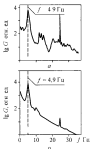


Рис. 10.8. АСПМ сигналов ДАП (а) и ИК (б), блок I КоАЭС

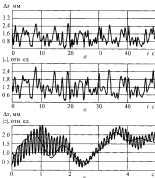


Рис. 10.9. Радиус-вектор траектории шахты АзЗ и огибающая сигнала ИК: а — радиус-вектор траектории; б — огибающая сигнала ИК; в — радиус-вектор (сплошная линия) и огибающая (пунктирная) в увеличенном масштабе

вым фильтром вокруг центральной частоты колебаний шахты (4.9 Гц), затем оценивались функции траектории. Оказалось, что поведение радиус-вектора траектории во времени очень напоминает поведение огибающей процесса (рис. 10.9).

На больших временных интервалах, например, на интервале 0—50 с создается иллюзия, что вместе с процессом изображена его огибающая. Но на малых временных интервалах 0—5 с видно, что в радиус-векторе наблюдаются ВЧ-осцилляции, несомненно связанные с огибающей. И огибающая, и радиус-вектор траектории являются неотрицательно определенными функциями времени, но радиус-вектор чувствителен ко всем частотным составляющим сигналов ИК, а огибающая — только к НЧ-составляющим.

Напомним, что огибающая является автохарактеристикой исходного процесса, т. е. огибающая есть результат нелинейных преобразований, производимых только над одним исходным процес-

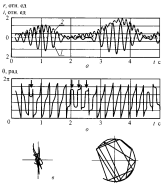


Рис. 10.10. Характеристики отклонения шахты от равновесного положения α — сигнал ИК (1) и радиус-вектор траектории (2); θ — угол траектории; α , θ над траекторией $\Delta r(\theta)$ и $r + \Delta r(\theta)$ соответственно

сом. Траектория же получается как результат нелинейных преобразований над сигналами сразу трех ИК. Можно сделать вывод о том, что по своим низкочастотным свойствам радиус-вектор траектории шахты $Ak3$ и огибающая сигнала любой из ИК идентичны. Иными словами, и диагностические возможности радиус-вектора траектории близки к диагностическим возможностям огибающей сигнала ИК. Но наиболее чувствительной характеристикой к особым точкам траектории является функция угла траектории.

На рис. 10.10 показаны особые точки (локальные экстремумы, точки перегиба, точки возврата) угла траектории и, как следствие, смены знака наклона прямолинейных участков, что означает смену направления движения шахты (такие временные участки показаны стрелками). Существенно, что они соответствуют небольшим значениям радиус-вектора.

Спектральные характеристики рассматриваемых функции пред

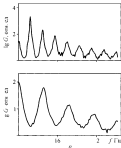


Рис. 10.11 АСПМ угла траектории (а) и АСПМ радиус вектора траектории (б)

ставляют собой гармонические ряды (рис. 10.11). В спектре радиус-вектора траектории отсутствует первая и все нечетные гармоники, что соответствует эллиптическому характеру усредненной траектории. Кроме того, значительная мощность в АСПМ сосредоточена вблизи нуля, что можно трактовать как мощность круговой составляющей траектории. В спектре угла траектории присутствуют все последовательные гармоники оборотной частоты колебаний шахты. По их виду трудно судить о таких аномалиях в поведении угла, как особые точки или перемены наклона кривой. Их лучше исследовать отдельно во временной области.

Траектория в декартовых координатах будем представлять функциями угла и радиуса-вектора, а в полярных координатах — двумя типами графиков. Первый тип — функция $\Delta r(\theta)$, получаемая в соответствии с рассмотренной выше моделью (рис. 10.10,а), второй тип — та же функция, но с некоторой постоянной составляющей, имитирующей радиус шахты: $r + \Delta r(\theta)$, $r \gg \Delta r(\theta)$ (рис. 10.10,б). В первом случае дается траектория движения центра шахты вокруг положения равновесия, во втором — траектория движения точки, находящейся на поверхности шахты. Из графика $r + \Delta r(\theta)$ следует, что существуют такие моменты времени,

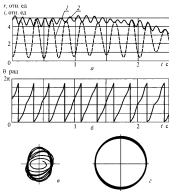


Рис. 10.12. Характеристики отклонения шахты от равновесного положения: а — сигнал НК (1) и радиус-вектор траектории (2); б — угол траектории; в — r и θ траектории $\Delta r(t)$ и $r + \Delta r(t)$ соответственно

когда шахта переходит с одной точки траектории на другую удаленную точку, нарушая при этом монотонный характер движения. Скачком изменяется угол траектории, иногда с изменением направления движения.

Следующий фрагмент траектории (рис. 10.12) соответствует максимальному отклонению шахты. Здесь локальных экстремумов нет, траектория имеет ярко выраженный эллиптический характер, причем оси эллипса медленно вращаются вокруг положения равновесия. Поэтому на функции угла траектории можно найти точки перегиба.

В ВВЭР 440 восемь нижних шпонок расположены равномерно по азимуту, т.е. угол между двумя соседними шпонками составляет 45° . Степень их износа неодинакова, и в разных точках траектории они по-разному участвуют в закреплении шахты к кор

пуску реактора. По уже рассмотренным фрагментам траектории видно, что в равновесном положении и при малых отклонениях от него шакта имеет больше степеней свободы, чем в любом другом положении. Это означает, что в данном случае шпоночные соединения не обеспечивают жесткого закрепления шакта с корпусом реактора. И напротив при больших амплитудах шакта и корпус колеблются как единое целое.

Таким образом по особым точкам траектории для тех ее участков, которые мало отклоняются от положения равновесия, можно судить о степени изношенности шпонок. Данная идея является развитием подхода к анализу локальных петель траектории [3]. Отличие состоит в том, что там анализировали значительные аномальные колебания шакта, которые по своему размаху в 10 раз превосходили колебания в нормальных условиях. Локальные петли траектории возникали вследствие значительного износа всех шпонок не только в положениях шакта близких к равновесному, но и в любых других.

Из анализа особых точек следует, что существуют такие углы на которых траектория чаще всего претерпевает разрыв, более того, при таком разрыве существуют преимущественные, параллельные направления движения шакта. Идея диагностирования шпонок состоит в том, что если какое-то направление чаще других проявляет себя в траектории как особое, значит в перпендикулярном ему направлении существуют максимальные зазоры в шпоночных соединениях, обеспечивающие такую степень свободы. Ближайшая к этому направлению пара противоположно расположенных шпонок и попадет под подозрение о максимальной изношенности.

Теперь можно перейти от отдельного анализа особенностей траектории шакта во времени к некоторым статистическим характеристикам. Для этого отметим на графике угла траектории все локальные экстремумы, исключая, конечно, экстремумы, вызванные разрывностью функции при переходе от 2π к 0 . В результате получим массив углов, на которых траектория носит немонокотный характер (в частности, сюда войдут и локальные петли). Построим распределение этих углов (частоту их появления в массиве). Если такое распределение представляет собой постоянную по аргументу функцию (равномерное распределение), то движение

шпалты в особых точках траектории носит чисто случайный характер. Значит, и изношенность всех шпалок примерно одинакова. Если же в упомянутом распределении существует значимый глобальный максимум, то отсчитав от этого значения угла $\pi/2$ получим направление, на котором пара шпалок обладает максимальным износом.

На рис. 10.13 показана такая функция распределения. Она обладает двумя ярко выраженными максимумами — при угле 30° и 300° . Заметим, что угловое расстояние между этими максимумами $\pi/2$ кратно шагу расположения шпалок 45° . Таким образом, получаем два направления ($300^\circ + 90^\circ = 360^\circ + 30^\circ$ и $30^\circ + 90^\circ = 120^\circ$) на которых четыре шпалки обладают максимальными зазорами (напомним, что угол траектории отсчитывается от первой нонизационной камеры по часовой стрелке). Данные направления оказались взаимно перпендикулярными и это означает, что из восьми шпалок одна половина (через одну) изношена больше, чем другая.

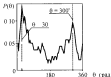


Рис. 10.13. Вероятность появления особых точек функции угла траектории

10.3 Исследования шумов ДПЗ совместно с сигналами SUS на блоках I и II КоАЭС

Важная проблема обоснованного продления срока эксплуатации РУ с ВВЭР-440 вызвала необходимость расширения наблюдемости оборудования РУ и в частности измерений вибросостояния ВКУ, РК и АРК [4—7]. К этому же решению подталкивает и другая проблема: разработка нового поколения виброустойчивых РК для ВВЭР-440. Разработчикам РК и АРК необходим оперативный контроль условий эксплуатации опытного топлива.

Обе перечисленные задачи потребовали расширения многоканальных измерений сигналов SUS вследствие освоения шумовых сигналов ДПЗ и увеличения числа сигналов ИК. Для этого на двух первых блоках КоАЭС (проект В-230) была внедрена система контроля вибраций ВКУ (АК ВКУ), позволяющая регистрировать шу-

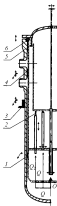


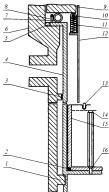
Рис. 10.14. Схематическое изображение узлов крепления корпуса ВКУ, РК и АРК и направления колебаний при изменении жесткости соответствующего узла крепления:

1 – виброисполнители (шланги); 2 – упругий блок РК; 3 – опорный бурт корпуса; 4 – раздатчик потока; 5 – упругий блок БЗТ; 6 – трубопроводные сегменты

мощен компонент сигналов штатных ИК. Тем самым было увеличено число ИК в СВШК. Для регистрации шумов ДПЗ применялась мобильная отечественная 20-канальная информационно-измерительная система, разработанная на предприятии «Диапром». В результате этой модернизации в 2000 г. впервые в России на РУ ВВЭР-440 были зарегистрированы флуктуационные составляющие сигналов ДПЗ и, что существенно, многоканальные записи содержали как сигналы SUS , так и шумовые компоненты сигналов ДПЗ и ИК.

На рис. 10.14 схематично изображены наиболее ответственные узлы крепления определяющие вибросостояние корпуса ВКУ, РК и АРК. РК, являясь частью конструкции РУ, совершают вынужденные колебания на частотах вибраций корпуса РУ и шахты реактора. Эти частоты, в свою очередь, определяются состоянием

Рис. 10.15. Узлы крепления ВКУ и РК:
 1 — шпонка; 2 — фиксирующий штирь;
 3 — разделитель потока; 4 — пласти; 5 —
 верхняя шпонка; 6 — корпус; 7 —
 трубчатый сегмент; 8 — жесткий упор
 пласти; 9 — крайник; 10 — жесткий упор
 БЗТ; 11 — пружинный блок БЗТ; 12 —
 БЗТ; 13 — шпонка на БЗТ; 14 —
 поддерживающий штирь РК; 15 —
 коряна; 16 — посадочное гнездо в
 корпусе под РК.



ем опорного бурта реактора, упругих трубчатых сегментов, разделителя потока и виброгасителей (шпонок). На рис. 10.14 стрелками показаны преимущественные направления колебаний, которыми управляют жесткости перечисленных узлов крепления.

Конструктивные особенности крепления АРК на верхнем блоке таковы, что ее вибросостояние не зависит от ВКУ, а зависит от собственных вибросвойств и вибросостояния верхнего блока АРК, будучи подвешенными к верхнему блоку РУ, совершают еще и вынужденные колебания на его собственных частотах.

Еще одна особенность конструкции ВВЭР-440 состоит в том, что расходы через РК и АРК зависят друг от друга $Q_2 = Q_{РК} + Q_{АРК}$. Поэтому расход ТН, как один из важнейших факторов вибронагрузки, для РК и АРК выступает с разными знаками (увеличение расхода через РК приводит к уменьшению расхода через АРК и наоборот).

На рис. 10.15 представлены узлы крепления ВКУ и РК. Износ

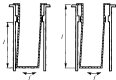


Рис. 10.16. Изменение собственной частоты колебаний шахты при наличии зазора в разделителе потока

этих узлов (или их непроектное состояние) также влияет на спектральные образы сигналов ДАП, ИК и ДПЗ.

Увеличение зазоров в нижних шпоночных узлах приводит к появлению низшей формы колебаний шахты, аналогичной форме колебаний стержня с одним верхним закрепленным концом.

Неполное обжатие шахты в разделителе потока также уменьшает ее собственную частоту (рис. 10.16). А когда в обоих, упомянутых выше, горизонтах крепления шахты имеются значительные износы, то на собственную частоту колебаний шахты начинают влиять свойства ее верхних узлов крепления.

Только на верхнем узле крепления шахты, применены упругие элементы (трубчатые сегменты). Изменение их упругих свойств теперь также будет изменять собственную частоту колебаний шахты. Это изменение можно проследить в течение одного топливного цикла. Затем после ППР трубчатые сегменты заменяют на новые, и собственная частота колебаний шахты восстанавливается (увеличивается). Аномальное крепление верхнего узла шахты может существенно изменить СО сигналов ДАП, ИК и ДПЗ. На пример, «пережатие» — увеличение прижимного усилия со стороны крышки реактора сверх проектной нормы — может привести к тому, что крышка реактора будет соприкасаться с жесткими предохранительными упорами и верхний узел крепления шахты потеряет свою упругость. В этом случае возможны ударные взаимодействия ВКУ и корпуса реактора.

Таким образом, наблюдение за трендом собственной частоты колебаний шахты по сигналам ИК, ДПЗ и ДАП в течение одно

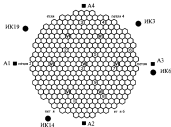


Рис. 10.17. Картограмма активной зоны блока I КоАЭС.

ИК — ионизационная камера; А1—А4 — ДАП (римскими цифрами показано местоположение шестой группы СУЗ, арабскими — номер и положение РК с ДПЗ)

го топливного цикла и/или в течение длительного времени, со измеримого с полным сроком эксплуатации блока дает информацию о состоянии узлов крепления ВКУ.

На рис. 10.17 представлено взаимное расположение ДАП (А1—А4), ИК (ИК3, ИК6, ИК14, ИК19) и одиннадцати измерительных каналов ДПЗ (со 2-го по 12-й)

Детекторы прямого заряда установлены гирляндами по семь непосредственно в центральных трубках РК. При контроле вибраций топлива необязательно измерять показания всех 77 (11×7) ДПЗ одновременно, достаточно построить процедуру регистрации некоторых комбинаций ДАП, ДОП — ИК, ДПД и ДПЗ. В противном случае СВЩД разрастается до системы с числом измерительных каналов более 100.

Приведенные в предыдущих разделах диагностические признаки вибраций ВКУ и ТВС, остаются в силе и для сигналов ВВЭР-440. Кроме них ниже рассмотрены специфические признаки вибраций связанные с особенностями конструкции данного типа ВВЭР.

ДПЗ чувствительны к вибрациям РК, в которой они установлены, к вибрациям соседних РК и к вибрациям АРК, будь то соседняя или удаленная от ДПЗ АРК. Последнее теоретически воз-

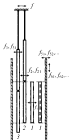


Рис. 10.18. Колебания РК и АРК на собственных и вынужденных частотах: 1 — РК; 2 — АРК на верхнем концевишке; 3 — АРК регулирующей группы



Рис. 10.19. Моды колебаний АРК: а — двойной маятник; б — простым маятник

можно вследствие глобальных нейтронных эффектов. Они возникают при вибрациях АРК даже если это всего одна кассета. Такова специфика ВВЭР-440 у которых вес стержня АРК по реактивности достаточно высок чтобы вызывать глобальные изменения нейтронного потока.

РК, оснащенная ДПЗ, в качестве своих ближайших шести соседних кассет может иметь (рис. 10.18):

- 1) такую же РК, но уже без ДПЗ (см. поз. 1 на рис. 10.18),
- 2) АРК, не участвующую непосредственно в процессе управления на номинальном уровне мощности и поэтому, находящуюся на верхних концевишках (см. поз. 2, на рис. 10.18);
- 3) АРК, принадлежащую шестой регулирующей группе которая перемещается в течение топливного цикла, компенсируя различные реактивностные эффекты (см. поз. 3 на рис. 10.18).

АРК как колебательная система, представляет собой двойной маятник с незакрепленным нижним концом. В простейшем случае двойной маятник имеет две собственные частоты с двумя модами колебаний, изображенными на рис. 10.19. Причем, собст

в.ная частота, соответствующая моде на рис. 10.19,б меньше собственной частоты, соответствующей моде на рис. 10.19,а. Очевидно, обе перечисленные собственные частоты АРК (см. рис. 10.18) меньше собственной частоты колебаний РК с двумя закрепленными концами (f_1). В эксплуатационных условиях собственные частоты АРК шестой группы (f_5, f_{31}) всегда меньше соответствующих собственных частот АРК любых других групп (f_3, f_{21}).

Наиболее низкие собственные частоты (f_5, f_{31}) будут наблюдаться у АРК шестой группы в начале кампании, когда общая длина двойного маятника максимальна. За кампанию эта длина уменьшается (из активной зоны выводится поглощающая часть и вводится топливная часть АРК). При длительных наблюдениях шумов ДПЗ она может быть идентифицирована по признаку изменения местоположения резонанса на оси частот в соответствии с перемещением шестой группы АРК.

Особые фазовые соотношения можно ожидать между сигналом ДПЗ, находящегося вблизи поглощающей части и сигналом ДПЗ, находящегося вблизи топливной части АРК шестой группы. На пример, синфазное движение поглощающей и топливной частей по направлению к РК с ДПЗ приведет к противофазности сигналов ДПЗ, ближайших, соответственно, к поглощающей и топливной частям РК. Опасение вызывает лишь очень малый уровень сигнала ДПЗ вблизи поглотителя, вследствие чего он может быть сравним с паразитными шумами или даже быть меньше их.

АРК крепятся на верхнем блоке РУ, который также представляет колебательную систему. Колебания верхнего блока на собственной частоте (f_6) приводят в движение подвеску (точку крепления) АРК. Кроме частот колебаний верхнего блока реактора в сигналах ДПЗ могут наблюдаться дискретные ряды собственных частот маятниковых ($f_5, f_{31}, \dots > 4,5 \text{ Гц}$) и вертикальных колебаний шахты ($f_6, f_{61}, \dots > 20 \text{ Гц}$).

Выше рассматривались идеализированные представления о колебаниях АРК как двойного маятника. В действительности, шарнирные соединения АРК и гексагональная геометрия ограничивают амплитуды их колебаний. Наличие трения в шарнирных соединениях также может воздействовать на амплитудные, частотные и фазовые признаки. И, самое главное, очень малые зазоры между чехлами соседних РК и АРК допускает их соударение. В



Рис. 10.20. Моды колебания РК и соответствующие эпоры.

а — при проектных условиях закрепления; б, в — при аномальном закреплении

результате таких нелинейных взаимодействий, как удар, все перечисленные признаки могут претерпевать значительные изменения по сравнению с идеализированным случаем.

РК как колебательная система по проектным условиям эксплуатации должна представлять собой балку с двумя закрепленными концами. Тип колебаний и соответствующая эпора показаны на рис. 10.20, а.

Случаи аномального закрепления РК иллюстрируются рис. 10.20, б, в. Колебания со свободным верхним концом — гипотетический случай, возникающий при полной потере упругих свойств пружинного блока РК. При этом остаточные деформации должны быть так велики, что пружины укорачиваются до размеров, при которых отсутствует ее физический контакт с БЗТ.

Второй аномальный случай колебаний РК с одним закрепленным концом (нижним) возникает при недостаточном усилии вертикального пружина со стороны БЗТ и/или большого поканального расхода теплоносителя, и/или увеличении гидравлического сопротивления РК в процессе ее эксплуатации. Перечисленные эффекты могут сопровождаться перемещением РК вверх на расстояние не превышающее «свободный ход» пружинного блока (всплытие РК). Оба аномальных случая характеризуются монотонными эпорами, а фазовый признак для всех рассмотренных типов колебаний (включая и проектный) дает один и тот же результат: любые комбинации пар сигналов ДПЗ — синфазны.

В спектральных характеристиках сигналов ДАП, ИК, ДПЗ блоков I и II КоАЭС доминируют пики абанон частоты 5 Гц (рис. 10.21). Они присутствуют также во взаимных характеристиках всевозможных пар сигналов ДАП, ИК, ДПЗ (рис. 10.22) что свидетельствует

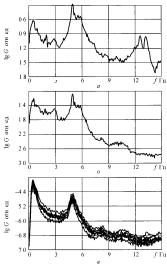


Рис. 10.21. АСПМ сигналы ДАП1 (а), НК106 (б) и сигналов систем ДПЗ (в) установленных в одной РК с координатами 19-50, блок II КвАЭС

во-первых о вибрационном характере их происхождения вследствие того, что они наблюдаются в сигналах ДАП

во-вторых, о том, что корпус шахта и РК находится в совместном колебательном движении

в-третьих о значительной мощности этих колебаний в результате того, что они раскачивают как корпус реактора (сигналы

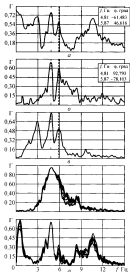


Рис. 10.22. Функции когерентности сигналов (блок II КоАЭС): ИК86—ИК10 (а); ДАП2—ДАП3 (б); ДАП1—ИК10 (в); ДАП2—ДПЗ сборка 19-30 (г); ИК86—ДПЗ сборка 19-30 (д)

ДАП) так и шахту активной зоны (сигналы ИК) совместно с РК (сигналы ДПЗ)

Функции когерентности пар сигналов ДАП-ИК, ИК-ДПЗ, ДПЗ-ДАП позволяют выделить два пика на частотах 4,8 и 5,9 Гц. На этих частотах происходят два разных типа совместных коле-

бания корпуса реактора и шахты АкЗ. По фазовым соотношениям, приведенным в таблицах на рис. 10.22, можно составить представление об усредненной траектории движения корпуса и шахты. Фазы соседних ДАП (см. таблицу на рис. 10.22), расположенных под прямым углом, также близки к $\pi/2$, что свидетельствует о близости траектории движения корпуса реактора к круговой траектории, а противоположные знаки фаз на частотах 4,8 и 5,9 Гц свидетельствуют о противоположных направлениях вращения корпуса на этих близких друг к другу частотах. Небольшое отличие упомянутых выше фаз от $\pi/2$ носит устойчивый от эксперимента к эксперименту характер, а значит траектории не являются точно круговыми, а имеют некоторую эллипсность. Фазы сигналов ИК06 и ИК10 на частотах 4,8 и 5,9 Гц также обладают разными знаками, но их абсолютные значения свидетельствуют о том, что траектория шахты далека от круговой.

В предыдущих разделах описаны два механизма появления флуктуаций ДПЗ при колебаниях шахты. Первый состоит в том, что вибрационные источники НШ возникают вследствие геометрических микроизменений гетерогенной структуры в системе «топливо-замедлитель-поглотитель» по отношению к ДПЗ при совместных или индивидуальных колебаниях корпуса реактора шахты реактора, РК, АРК на собственных или вынужденных частотах, второй — вследствие изменения границ АкЗ при колебаниях шахты. Оба механизма присутствуют и при колебаниях шахты ВВЭР-440, но конструкции АкЗ и АРК ВВЭР-440 порождают третий механизм, свойственный только ВВЭР-440.

Места установки РК с ДПЗ выбраны таким образом, что из шести соседних кассет всегда одна кассета принадлежит той или иной группе АРК. АРК не связана жестко с шахтой, и при ее колебаниях АРК остается в неподвижном равновесном положении вследствие чего изменяется расстояние АРК-ДПЗ до того момента времени, когда АРК, исчерпав водяной зазор, соприкоснется с соседней РК. Водяные зазоры, схематически изображенные на рис. 10.23, у АРК больше межкассетных зазоров РК, а колебания шахты модулируют их толщину.

Фазы между сигналами ИК и ДПЗ зависят от их взаимного расположения по отношению РК с ДПЗ и АРК. Если шахта совершает маятниковые колебания и в направлении этих колебаний

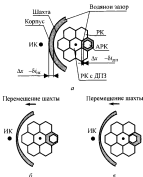


Рис. 10.23. Механизм образования флуктуации сигнала ДПЗ при колебаниях шашты
 а — равновесное состояние корпуса, шашты и АРК; б — сигналы ИК и ДПЗ противофазны (Δx уменьшается, Δx увеличивается); в — сигналы ИК и ДПЗ синфазны (Δx уменьшается, Δx уменьшается)

РК с ДПЗ занимает промежуточное положение между ИК и АРК, то сигналы ДПЗ и ИК будут противофазны (рис. 10.23,б).

Действительно, ток ИК возрастет из-за уменьшения водяного зазора шашта-корпус, а ток ДПЗ уменьшится вследствие увеличения толщины водяного зазора в АРК. Если АРК занимает промежуточное положение между ИК и РК с ДПЗ, то сигналы ИК и ДПЗ будут синфазны (рис. 10.23, в).

Направление маятниковых колебаний шашты существенным образом влияет на уровень сигнала ДПЗ. На рис. 10.24 приведены два экстремальных случая. В одном случае (а) толщина водяного зазора меняется от нуля до максимально возможного значения, в другом (б) — практически не меняется, что делает флуктуации тока ДПЗ на этой частоте практически нулевыми. При этом амплитуды колебаний АРК в обоих случаях близки друг к



Рис. 10.24. Влияние направления маятниковых колебаний на флуктуирующий сигнал: а, б — соответственно максимальное и минимальное воздействие колебаний РК на сигнал ДПЗ (стрелками показано направление колебаний АРК)

другу (различаются в $\sqrt{3/2}$ раз) — но уровень сигналов ДПЗ будет различаться значительно.

Такой же, как и рассмотренный выше механизм образования флуктуаций ДПЗ имеет место и для случая вынужденных вибраций АРК на частотах верхнего блока РУ. Этот тип колебаний более всего приближен к однонаправленному маятниковому типу. Как показано в предыдущих разделах, шахта движется по эллиптическим траекториям, близким к крутовым, имея при этом еще и стохастический компонент траектории. В этом случае, как бы ни была ориентирована пара «РК с ДПЗ — АРК», колебания шахты всегда будут наблюдаться в сигналах ДПЗ. Вынужденные вибрации АРК на частоте колебаний верхнего блока являются коррелированными, т.е. коррелированными.

Различные фазовые соотношения между сигналами ДПЗ-ДАП, ДПЗ-ИК, ДПЗ-ДПД, ДПЗ-ДПЗ (для пар ДПЗ, установленных в разных РК) дают дополнительную информацию о причинах происхождения той или иной спектральной особенности. Например, функция когерентности сигнала ДПЗ и сигнала ДАП позволяет среди множества вибрационных источников, наблюдаемых на корпусе РУ, выделить только те, которые соответствуют совместным колебаниям корпуса, ВКУ и РК. Причем — это должны быть мощные источники колебаний.

Как уже продемонстрировано в предыдущих разделах, ДПЗ чувствительны как к гидравлическим, так и к вибрационным источникам внутризонного нейтронного шума. Эти источники могут как конкурировать друг с другом, находясь в одном частот-

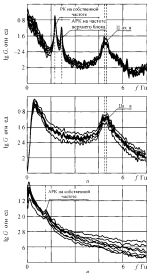


Рис. 10.25. Семейства АСПМ ДПЗ

а — блок I КоАЭС; б — блок II КоАЭС; в — блок II АЭС в Богунце

ном диапазоне (блок I КоАЭС), так и занимать индивидуальные частотные полосы (АЭС Богунце, см. рис. 10.2).

Спектральные образы сигналов ДПЗ РУ ВВЭР-440 одного и того же проекта (В-230) могут значительно отличаться друг от друга. Например, на блоке I КоАЭС наблюдается богатый спектральный состав, обусловленный вибрациями АРК, РК, верхнего бло-

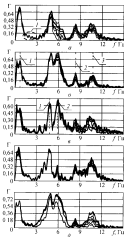


Рис. 10.26. Функции когерентности НК06—ДПЗ (блок II КоАЭС) для оборок ДПЗ с номерами 1 (а): 1 — группа низкокогерентных пиков, обусловленных вибрациями РК и АРК на собственных частотах; 2 (б): 1 — АСПМ_{КД}; 2 — АСПМ_{КВ}; 3 — АСПМ_{КВ}; 3 (в): 1 и 2 — 1-й и 2-й типы совместных колебаний корпуса и шахты сжатостенного; 8 (г); 11 (д)

ка реактора, шахты и корпуса (рис. 10.25,а). На блоке II КоАЭС аналогичные АСПМ ДПЗ гораздо беднее: единственная особенность вызвана колебаниями шахты (рис. 10.25,б). На блоке II АЭС Босуние единственный пик в АСПМ сигналов ДПЗ обусловлен вибрациями АРК на собственной частоте (рис. 10.25,в).

На блоке II КоАЭС во взаимных характеристиках сигналов ДПЗ (рис. 10.26) среди незначительных пиков (на уровне когерентности 0,1

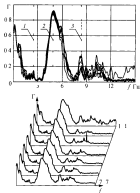


Рис. 10.27. Функции когерентности ДПЗ-ДПЗ (1-1, 2-2, ..., 7-7) сборок 3 и 8 (блок II КоАЭС);

1 — частота коллективных вibrаций РК и АРК; 2 — частота вibrаций шахты; 3 — частота АСВ.

и ниже) находятся пики на собственных частотах колебаний РК и АРК в диапазоне частот (1,5–2,8) Гц. Даже для сигналов ДПЗ-ДПЗ (рис. 10.27), расположенных в одном горизонте, но в разных РК, их когерентности слишком малы, чтобы свидетельствовать о наличии достаточной мощности коллективных вibrаций РК или АРК. Они вовсе отсутствуют в функции когерентности ДАП-ДПЗ даже на уровне низкокогерентных пиков, что еще раз свидетельствует о незначительной мощности колебаний РК и АРК на собственных частотах.

Таким образом, если по сигналам ДАП (т.е. по вибросостоянию корпуса) а также по сигналам виброзонных ИК, т.е. по вибросостоянию шахты, блок II КоАЭС аналогичен блоку I КоАЭС

то вибрации РК и АРК на собственных частотах на блоке II практически не наблюдаются в АСПМ. В любом случае они много меньше по амплитуде, чем на блоке I.

Наблюдаемое различие объясняется увеличением размера чехла РК «под ключ» от 143 до 145 мм. В результате уменьшаются зазоры между всевозможными соседними парами РК-РК, РК-АРК и ограничиваются возможности их свободных колебаний. Когда проводили шумовые эксперименты на блоке I КоАЭС, доля новых РК по отношению к РК старых габаритов была меньше соответствующей доли на блоке II.

Список литературы

1. Измерение расхода теплоносителя через топливный канал ВВЭР-440 по флуктуирующим сигналам датчиков прямого расхода / Г. В. Аркадов, О. В. Орчаров, В. И. Павелко и др. // *Атомная энергия*. 2001. Т. 91. Вып. 3. С. 167–174.
2. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Титов С.И. Нейтронно-шумовая вибродиагностика шахты активной зоны ВВЭР-440 // *Атомная энергия*. 2001. Т. 91. Вып. 4. С. 247–251.
3. Use of Noise Diagnostics for WWER-440 / A. Grabner, G. Grunwald, P. Liewers et al. // IKF Report, Rosendorf, Germany, 1998.
4. Аникин Г.Г., Павелко В.И. Опыт внедрения систем виброконтроля на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР-440 // *Теплотехника*. 1999. № 6. С. 12–17.
5. Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. Some results of the vibrations analysis on the VVER-440 type reactor vessel top head and on the facilities of its primary circuit six loops // *A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics*. SMORN-VII. June 19–23, 1995, Avignon, France. Session 9 – Vibrations structures modeling and monitoring. Vol. 2. P. 168–172.
6. Применение систем виброшумовой диагностики для контроля условий эксплуатации топлива реакторов ВВЭР-440 / Г.В. Аркадов, В.Л. Молчанов, В.В. Новиков и др. // *Сб. докл. Российско-венгерско-финского семинара «Ядерное топливо ВВЭР-440. Опыт и перспективы»*, *Электросталь*, 10–12 августа, 2001.
7. Theoretical modeling and monitoring of WWER fuel assembly vibrations under operating conditions / G. Arkadov, O. Orcharov, V. Pavelko et al. // *Proc. Int. Conference on WWER fuel performance, modeling and experimental support*. Albena, Bulgaria, 1–5 October, 2001. P. 88–93.

ПРИЛОЖЕНИЕ

III Сведения, необходимые для оценивания передаточных функций систем с обратной связью

Рассмотрим взаимосвязи вероятностных характеристик внутренних измеримых флуктуаций $\{\delta x_i\}$, внешних независимых неизмеримых источников шумов $\{\delta q_i\}$ и передаточных функций закрытой системы (W).

Для этой элементарной двумерной (связывающей два измеряемых сигнала x_1, x_2) закрытой системы, изображенной на рис. П1.1 взаимосвязи флуктуаций описываются системой

$$\begin{cases} \delta x_1 = W'_{12} \cdot \delta x_2 + \delta q_1 \\ \delta x_2 = W'_{21} \cdot \delta x_1 + \delta q_2 \end{cases}$$

или в матричном виде

$$\begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & W'_{12} \\ W'_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta q_1 \\ \delta q_2 \end{bmatrix} \quad (\text{П1.1})$$

или в векторно-матричном виде

$$\delta X = W \cdot \delta X + \delta Q \quad (\text{П1.2})$$



Рис. П1.1 Двумерная закрытая система

которая имеет решение

$$\delta X = [I - W]^{-1} \delta Q = \frac{1}{1 - W'_{12} W'_{21}} \begin{bmatrix} 0 & W'_{12} \\ W'_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta q_1 \\ \delta q_2 \end{bmatrix} \quad (\Pi 1.3)$$

Умножая его на комплексно-сопряженное уравнение и усредняя перейдем от флуктуаций к спектральным плотностям

$$G_x = [I - W]^{-1} G_d [I - W]^{-*} \quad (\Pi 1.4)$$

где

$$G_x = \begin{bmatrix} G_x & G_{x,z} \\ G_{x,z} & G_x \end{bmatrix}$$

— матрица спектральных плотностей измеряемых процессов

$$W = \begin{bmatrix} 0 & W'_{12} \\ W'_{21} & 0 \end{bmatrix}$$

— матрица передаточных функций системы

$$G_d = \begin{bmatrix} G_q & 0 \\ 0 & G_q \end{bmatrix}$$

— матрица автоспектральных плотностей внешних неизмеряемых источников флуктуаций; δX , δQ — векторы измеряемых флуктуаций и внешних неизмеряемых источников; I — единичная матрица; $*$ — оператор комплексного сопряжения

Произведем умножения матриц в выражении (П1.4)

$$\begin{bmatrix} G_x & G_{x,z} \\ G_{x,z} & G_x \end{bmatrix} = \frac{1}{|1 - W'_{12} W'_{21}|^2} \times \\ \times \begin{bmatrix} G_q + G_q |W'_{12}|^2 & G_q W'_{12} + G_q W'_{21} \\ G_q W'_{21} + G_q W'_{12} & G_q + G_q |W'_{21}|^2 \end{bmatrix} \quad (\Pi 1.5)$$

Из эксперимента, в котором измерены два сигнала x_1 и x_2 , могут быть извлечены оценки трех функций: двух действительных G_{x_1}, G_{x_2} и одной комплексной (ВСПМ полностью определяется ВСПМ $G_{x_1 x_2} : G_{x_2 x_1} = G_{x_1 x_2}^*$). Незвестных же функций четыре:

две действительные — G_q, G_n ;

две комплексные — $W_{12} = \text{Re}_{12} + j \cdot \text{Im}_{12}, W_{21} = \text{Re}_{21} + j \cdot \text{Im}_{21}$.

Таким образом при шести действительных неизвестных ($G_q, G_n, \text{Re}_{12}, \text{Im}_{12}, \text{Re}_{21}, \text{Im}_{21}$) выражение (П1.5) дает всего четыре нелинейных уравнения

$$\begin{cases} G_x = C_w (G_q + G_n |W_{12}|^2), \\ G_{x_2} = C_w (G_q + G_n |W_{21}|^2) \\ \text{Re} G_{x_1 x_2} = C_w [\text{Re} G_q \text{Re} W_{12} + G_q \text{Re} W_{21}] \\ \text{Im} G_{x_1 x_2} = C_w [-G_q \text{Im} W_{12} + G_n \text{Im} W_{21}] \end{cases} \quad (\text{П1.6})$$

П2. МАР модели для оценивания передаточных функций закрытых систем

Двухмерная закрытая система, рассмотренная в предыдущем разделе, обобщается на любое число внутренних процессов. На рис. П2.1, П2.2, П2.3 изображены 2-, 3- и 4-мерные закрытые системы в каноническом виде. Слему шумовой динамики исследуемого объекта удобно представлять в соответствии с видом матрицы W у которой на главной диагонали — нулевые элементы. В этом смысле традиционное графическое изображение двумерной МАР-модели, изображенное на рис. П1.1, неудовлетворительно.

Подчеркнем еще раз, что данные схемы не являются ограничительными для анализа реальных динамических систем. Для любого исследуемого объекта между произвольной парой сигналов существуют, вообще говоря, прямая и обратная связи — а также влияния других измеренных и неизмеряемых процессов. Важно удовлетворить лишь условию независимости внешних источников.

Любой внутренний i -й процесс $\delta x_i(j)$ k -мерной закрытой системы получается как сумма собственного внешнего источника — с вкладами от всех других процессов $\delta x_j, (j \neq i)$, каждый из которых также имеет собственный внешний источник:

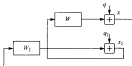


Рис. П2.1 Канонический вид двумерной замкнутой системы

$$\delta x(f) = \sum_{j=1, j \neq i}^k W_{ij}(f) \delta x_j(f) + \delta q(f) \quad (\text{П2.1})$$

В матричном виде уравнение П2.1 записывается следующим образом:

$$\delta X - W \delta X + \delta Q = 0 \quad (\text{П2.2})$$

где матрица **W** всегда имеет нулевую главную диагональ

$$W = \begin{bmatrix} 0 & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & 0 & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{П2.3})$$

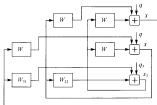


Рис. П2.2 Канонический вид трехмерной замкнутой системы

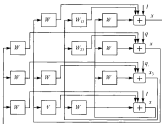


Рис. П2.3 Канонический вид четырехмерной закрытой системы

Многомерная авторегрессионная модель (МАР модель) представляет собой выражение:

$$\delta X(n) = \sum_{m=1}^P B(m) \delta X(n-m) + \delta E(n) \quad (\text{П2.4})$$

где $B(m)$ — $(k \times k)$ -матрица АR-коэффициентов; $\delta E(n)$ — $(1 \times k)$ вектор белого шума; n — дискретное время; P — порядок МАР модели.

Данный формализм предполагает, что существует такое число P , что k -мерный процесс $\delta X(n)$ может быть «выбелен» с помощью линейной комбинации предыдущих отсчетов компонент того же

вектора $\sum_{m=1}^P B(m) \delta X(n-m)$. Знание P матриц авторегрессионных коэффициентов $B(m)$, $m = 1, 2, \dots, P$ дает возможность оценить матрицу спектральных плотностей:

$$G_X(f) = \left[1 - \sum_{m=1}^P B(m) \exp(-j2\pi f \Delta t) \right] \times \\ \times \sum_{m=1}^P \left[1 - \sum_{m=1}^P B(m) \exp(-j2\pi f \Delta t) \right] \quad (\text{П2.5})$$

где Σ — диагональная матрица дисперсии «белых» источников. Алгоритм получения матриц авторегрессии $\mathbf{B}(m)$, $m=1, 2, \dots, P$ основанный на уравнении Юла—Уолкера, очень громоздок и не в ущерб пониманию МАР-анализа здесь не приводится.

Помимо традиционных характеристик, получаемых из спектральной матрицы G_x (модуль, фаза ВСПМ, функция когерентности), МАР-анализ позволяет найти передаточные функции закрытой системы только по реализациям внутренних процессов.

П3 Особая роль МАР-моделей при оценивании передаточных функций закрытых систем

Действуя традиционным способом оценить все передаточные функции закрытой системы, обладая только реализациями внутренних процессов δX , невозможно. Казалось бы, что и МАР-анализ, в результате которого получается та же спектральная матрица G_x , ничего нового не приносит. Однако формализм (1.36), если таковой достигим (если действительно существует такое число P , при котором «выбеливается» остаток), является очень сильным существенно улучшающим наблюдаемость закрытой системы. Для иллюстрации этого докажем следующие два утверждения:

1 Любая МАР-модель k -го порядка соответствует открытой схеме k -го порядка с «белыми» входными процессами.

Действительно, основное соотношение МАР-анализа (П2.4) после Фурье-преобразования

$$\delta X(f) = \sum_{m=1}^P \mathbf{B}(m) \delta X(f) \exp(-j2\pi m f \Delta t) + \delta E(f)$$

и приведения подобных членов

$$[1 - \Phi(f)] \delta X(f) = \delta E(f)$$

эквивалентно открытой схеме

$$\delta X(f) = \Phi(f) \delta E(f) \begin{bmatrix} \Psi & \Psi_{1k} \\ \Psi_k & \Psi_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta E_1 \\ \delta E_k \end{bmatrix} \quad (\text{П3.3})$$

с матрицами

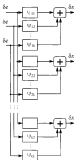
$$\Psi(f) = [I - \Theta(f)]^{-1} \Theta$$

$$\Theta(f) = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^p b_{11}(m) e^{-j2\pi f \Delta m} & \dots & \sum_{m=1}^p b_{1k}(m) e^{-j2\pi f \Delta m} \\ \vdots & & \vdots \\ \sum_{m=1}^p b_{k1}(m) e^{-j2\pi f \Delta m} & \dots & \sum_{m=1}^p b_{kk}(m) e^{-j2\pi f \Delta m} \end{bmatrix}$$

что эквивалентно схеме на рис. П3.1

2. Любая открытая система k -го порядка с «белыми» входами и передаточными функциями $\Psi(f)$ взаимно однозначно соответствует закрытой схеме k -го порядка с независимыми «цветными» внешними источниками

$$\delta q_i(f) = \frac{1}{1 - \Theta_{ii}(f)} \delta E_i(f) \quad i = 1, 2, \dots, k$$



и передаточными функциями

$$W_{rs}(f) = \frac{1}{1 - \Theta_{rr}(f)} \Theta_{rs}(f) \quad r, s = 1, 2, \dots, k; \quad r \neq s$$

Преобразуем передаточную матрицу открытой системы к виду

$$\Psi(f) = [I - O(f)]^{-1} [H_O(f) + A_O(f)]$$

где матрица H_O — диагональная

$$H_O(f) = \begin{bmatrix} 1 - O_{11}(f) & 0 & 0 \\ 0 & 1 - O_{22}(f) & 0 \\ 0 & 0 & 1 - O_{kk}(f) \end{bmatrix}$$

Рис. П3.1. Открытая система k -го порядка

а матрица A_O — с нулевой главной диагональю

$$A_0(f) = \begin{bmatrix} 0 & O_{12}(f) & \Theta_{1k}(f) \\ \Theta_{21}(f) & 0 & \Theta_{2k}(f) \\ \Theta_{k1}(f) & \Theta_{k2}(f) & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ПЗ } 5)$$

Для таких свойств матриц H_0 и A_0 разложение (ПЗ 4) единственно. Приведем уравнение (ПЗ.2) к виду

$$[H_0 + A_0] \delta X = \delta E \quad (\text{ПЗ } 6)$$

или

$$\delta X = H_0^{-1} A_0 \delta X + H_0^{-1} \delta E \quad (\text{ПЗ } 7)$$

что равносильно закрытой системе.

$$\delta X = W \delta X + \delta Q \quad (\text{ПЗ } 8)$$

с передаточной матрицей

$$W = -A_0 H_0^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\Theta_{12}}{1 - \Theta_{11}} & \frac{\Theta_{1k}}{1 - \Theta_{11}} \\ \frac{O_{21}}{1 - \Theta_{22}} & 0 & \frac{O_{2k}}{1 - \Theta_{22}} \\ \frac{O_{k1}}{1 - \Theta_{k1}} & \frac{O_{k2}}{1 - \Theta_{k1}} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ПЗ } 9)$$

4. ЦВЕТНЫМ ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ

$$\delta Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 - O_1} \delta E \\ \frac{1}{1 - O_{22}} \delta E_2 \\ \frac{1}{1 - O_{kk}} \delta E_k \end{bmatrix} \quad (\text{ПЗ } 10)$$

Эти два утверждения позволяют внутренние процессы закрытой системы анализировать МАР-моделью и в результате по схеме

$$\delta X \rightarrow B(1) \quad B(p) \rightarrow \Theta(f) \rightarrow \begin{cases} \rightarrow W \\ \rightarrow \delta Q \end{cases} \quad (\text{ПЗ 11})$$

получать все передаточные функции системы и автоспектральные характеристики всех внешних источников

П4. Формулы оценки МАР характеристик

На первом уровне (МАР анализ), традиционном для многомерного спектрального анализа, оцениваются:

1. Спектральная матрица

$$G(f) = \Delta t [B(f)]^H \Sigma [B(f)]^H$$

где

$$B(f) = \exp(-j2\pi f p \Delta t) \left[1 + \sum_k^L B_p(k) \exp(j2\pi f k \Delta t) \right]$$

I — $(m \times m)$ единичная матрица, $1/\Delta t$ — частота дискретизации
 H — операция комплексной транспонизации (обращение — транспонирование — комплексное сопряжение)

2. Матрица когерентности

$$\Gamma(f) = \{\Gamma_{ij}(f)\} = \frac{|G_{ij}(f)|^2}{G_{ii}(f)G_{jj}(f)} \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

3. Матрица фаз

$$\Phi(f) = \{\varphi_{ij}(f)\} = \arctg \left\{ \frac{\text{Im}[G_{ij}(f)]}{\text{Re}[G_{ij}(f)]} \right\} \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

где Im , Re — мнимая и действительная части

На втором уровне (МАР-декомпозиция), алгоритмы которого развиты в современных работах специалистов по реакторным шумам, оцениваются:

1 Нормированный глобальный вклад i -го независимого источника в j -й сигнал

$$A(f) = \{A_{ij}(f)\} = \frac{|(B(f)_i^{-1})|^2 \cdot \sigma_j}{G_{ij}(f)} \Delta f$$

где σ_j — jj -й диагональный элемент матрицы Σ , $G_{ij}(f) = g$ и диагональный элемент матрицы $G(f)$, $i, j = 1, 2, \dots, m$

2 Матрица передаточных функций закрытой системы

$$W(f) = \{W_{ij}(f)\} = -\frac{B_j(f)}{B_i(f)}$$

где $W_{ij}(f) = 0$ $i, j = 1, 2, \dots, m$ $i \neq j$

3 Спектральная матрица внешних источников

$$Q_j(f) = \frac{\sigma_j}{|B_j(f)|^2} \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

4 Функция частной когерентности

$$\gamma_j = \frac{|T_j(f)|^2}{T(f)T_j(f)}$$

где $T = Q_{ij} + W_{ij} Q_{jj} + W_{ji}^* + W_{ij} W_{ji} Q_{jj}$;

$$T = Q + \sum_{j=1}^m |W_j|^2 \cdot Q_{jj} + 2\text{Re}\{W_j \cdot Q_{jj}^*\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

5) Частная фаза

$$\varphi_j = \text{arctg} \left\{ \frac{\text{Im} \left[T_{ij} \right]}{\text{Re} \left[T_j \right]} \right\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Предисловие авторов	5
Список принятых сокращений	8
Глава 1. Виброакустическая диагностика в комплексе задач раннего диагностирования	10
1.1. Историческая справка	10
1.2. Задачи систем раннего диагностирования реакторной установки	14
1.3. Индикаторы, обусловленные аномально вибрационными ВКУ и ТВС	19
1.4. Особые свойства системы виброакустической диагностики	22
Глава 2. Виброакустическая диагностика, осуществляемая зарубежными программно-техническими комплексами	29
2.1. Зарубежный опыт виброакустической диагностики ТВС и ВКУ в эксплуатационных условиях	29
2.2. Первый международный стандарт по вибрациям ВКУ	46
2.3. Виброконтроль ВКУ и ТВС реакторов типа ВВЗР зарубежными программно-техническими комплексами	48
2.3.1. ВВЗР-440	48
2.3.2. ВВЗР-1000	59
Глава 3. Общие методы выделения диагностической информации из реакторных шумов	70
3.1. Особенности шумового объекта	70
3.2. Роль феноменологических моделей	73
3.3. Методы сигнатурной диагностики	76
3.4. Аналитические методы шумовой диагностики	8
3.5. Открытые и закрытые схемы динамики	86
3.6. Сведения, необходимые для оценки передаточных функций	88
3.7. Авторегрессионное разложение автоспектральной плотности на физически интерпретируемые составляющие	90
3.8. Многомерный авторегрессионный анализ	92
3.9. Катастрофное преобразование	99
3.10. Огибающая	101
3.10.1. Определение огибающей и метод ее оценки	101
3.10.2. Пример интерпретации совместных колебаний корпуса реактора и внутракорпусной полости с помощью огибающей	102
3.11. Демонстрация спектральных образов сигналов датчиков абсолютного перемещения по типам колебаний корпуса реактора	95

3.12. Методы анализа нейтронных шумов при маскирующем воздействии глобального компонента	110
Глава 4. Оценка времени зашумливания в реакторно-шумовых исследованиях	119
4.1. Простейшая модель	119
4.2. Влияние инерционности датчиков на оценку времени зашумливания	124
4.3. Принципы построения спектральных методов	126
4.4. Феноменологическая модель нейтронного шума ВВЭР	128
4.4.1. Общие положения	128
4.4.2. Спектральные характеристики процессов	131
4.4.3. Решение в модели глобального зашумления	134
4.4.4. Спектральные функции, не зависящие от глобального зашумления	136
Глава 5. Моделирование вибрации	148
5.1. Микетные и стендовые вибрационные исследования ВКУ и ТВС ВВЭР	148
5.2. Расчетное моделирование вибраций ВКУ и ТВС ВВЭР	156
5.2.1. Моделирование вибраций ТВС ВВЭР-1000	157
5.2.2. Моделирование ВКУ ВВЭР-1000	159
5.2.3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по вибрации шесты ВВЭР-1000	160
5.2.4. Моделирование вибраций ТВС ВВЭР-440	162
5.2.5. Моделирование вибраций шесты ВВЭР-440	163
Глава 6. Специфические режимы функционирования СВЩД	171
6.1. Информация для СВЩД, которую необходимо получить при вибронизмерениях на пучках блоков ВВЭР	171
6.2. Пример локализации собственных колебаний ТВС по результатам вибронизмерений в ПНИ	174
6.3. Базовые измерения	177
6.4. Виброизмерительный контроль при эксплуатации опытной ТВС	187
Глава 7. Нейтронный шум ВВЭР	195
7.1. Простые модели воздействия вибраций ВКУ и ТВС на нейтронный поток	195
7.2. Возможности шумового анализа сигналов ДПЗ	198
7.3. Феноменологическая модель нейтронного шума	199
7.4. Характерные признаки коллективных вибраций ТВС и вибраций шесты, получаемые по сигналам онлайн мониторинговых камер	200
7.5. Признаки, по которым обнаруживаются вибрации ТВС	203
7.5.1. Амплитудные признаки	203
7.5.2. Фазовые признаки и маскирующие эффекты	205
7.5.3. Гармонические и субгармонические признаки	207
7.5.4. Многомерные авторегрессионные признаки	208
7.6. Флуктуация тока ДПЗ при коллективных вибрациях ТВС	209
7.6.1. Общие положения	209
7.6.2. Соседние и удаленные ДПЗ	211

7.6.3. Метод трех ДПЗ для компенсации глобального компонента нейтронного шума на частоте вибраций ТВС	215
7.7. Модель внутреннего нейтронного шума, возникающего при колебаниях шихты	216
7.8. Сравнение диагностических возможностей вне- и внутрисигмового нейтронно-шумовых каналов	220
7.9. Теплогидравлические источники нейтронного шума маскирующие вибрационные эффекты	222
7.9.1. Проникновение link-структур	222
7.9.2. Link-структуры, обусловленные глобальным компонентом нейтронного шума	225
7.9.3. Link-структуры, возникающие вследствие усреднений по пространственным координатам	227
7.9.4. Link-структуры, обусловленные аксиальной неравномерностью поля энерговыделения	229
Глава 8. Экспериментальные спектральные характеристики шумов ВВЭР-1040	232
8.1. Экспериментальные условия	232
8.2. Спектральные характеристики сигналов НК и ДПД	234
8.3. Фазовые соотношения в парах сигналов НК, НК, НК, ДПД	239
8.4. АСВ в сигналах ДАП, НК, ДПД, ДПЗ, ДВП	240
8.5. Коллективные вибрации ТВС	246
8.6. Характерные особенности взаимных спектральных функций сигналов ДПЗ и НК, не связанные с эффектами вибраций ВКУ и ТВС	259
8.7. Изменчивость спектральных образов во времени	269
Глава 9. Оптимизация СВШД	279
9.1. Общие сведения	279
9.2. Сценарий вибродиагностики как элементнометодического обеспечения СВШД	286
9.3. Пример обработки сигналов СВШД по одному из сценариев	290
9.4. Пример функционирования СВШД в режиме контроля перемещений основного оборудования	296
Глава 10. Экспериментальные виброшумовые исследования на РУ типа ВВЭР-440	300
10.1. Измерение поперечной скорости теплинтоном по флуктуациям сигналов ДПЗ на АЭС Бонунис	300
10.2. Нейтронно-шумовая оценка траектории шихты активной зоны ВВЭР-440	305
10.3. Исследования шумов ДПЗ совместно с сигналами SUS на блоках I и II КоАЭС	315
ПРИЛОЖЕНИЕ	332
П1. Сведения, необходимые для оценивания передаточных функций систем с обратной связью	332
П2. MAP-модели для оценивания передаточных функций закрытых систем	334
П3. Особая роль MAP-моделей при оценивании передаточных функций закрытых систем	337
П4. Формулы оценки MAP-характеристик	340