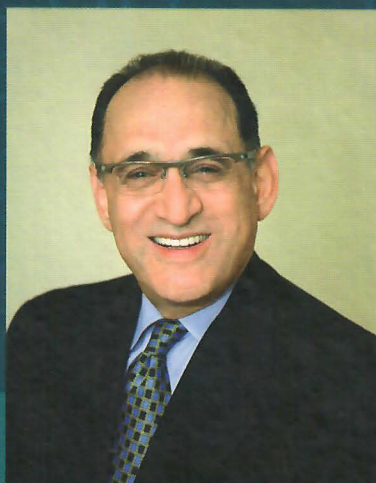




Х.М. Хашемиан —

выпускник Национального Университета Ирана со степенью бакалавра по физике. Имеет также степень доктора технических наук в области электротехники и степень доктора философии в области атомной техники. Президент и управляющий директор корпорации Analysis and Measurement Services (AMS), поставляющей оборудование и осуществляющей обучение персонала практически для всех АЭС в США и для многих станций в Европе и Азии. AMS специализируется на испытаниях контрольно-измерительных приборов и систем на АЭС, диагностике реакторов и разработке автоматической испытательной аппаратуры и программного обеспечения для энергетики.

Х.М. Хашемиан выполнял работы для Департамента энергетики США, Комиссии по ядерному регулированию США, Национального управления по авиации и исследованию космоса, Военно-воздушных сил США, Международного агентства по атомной энергии и Международной электротехнической комиссии.

Автор — член Общества специалистов по измерительным устройствам и автоматическим системам, играет важную роль в работе Института инженеров по электротехнике и электронике и является членом Американского ядерного общества и Европейского ядерного общества.

Х.М. Хашемиан — автор более 200 научных публикаций. Его книги переведены на русский, японский, китайский и корейский языки.

ISBN 978-5-9518-0481-5



9 785951 804815

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

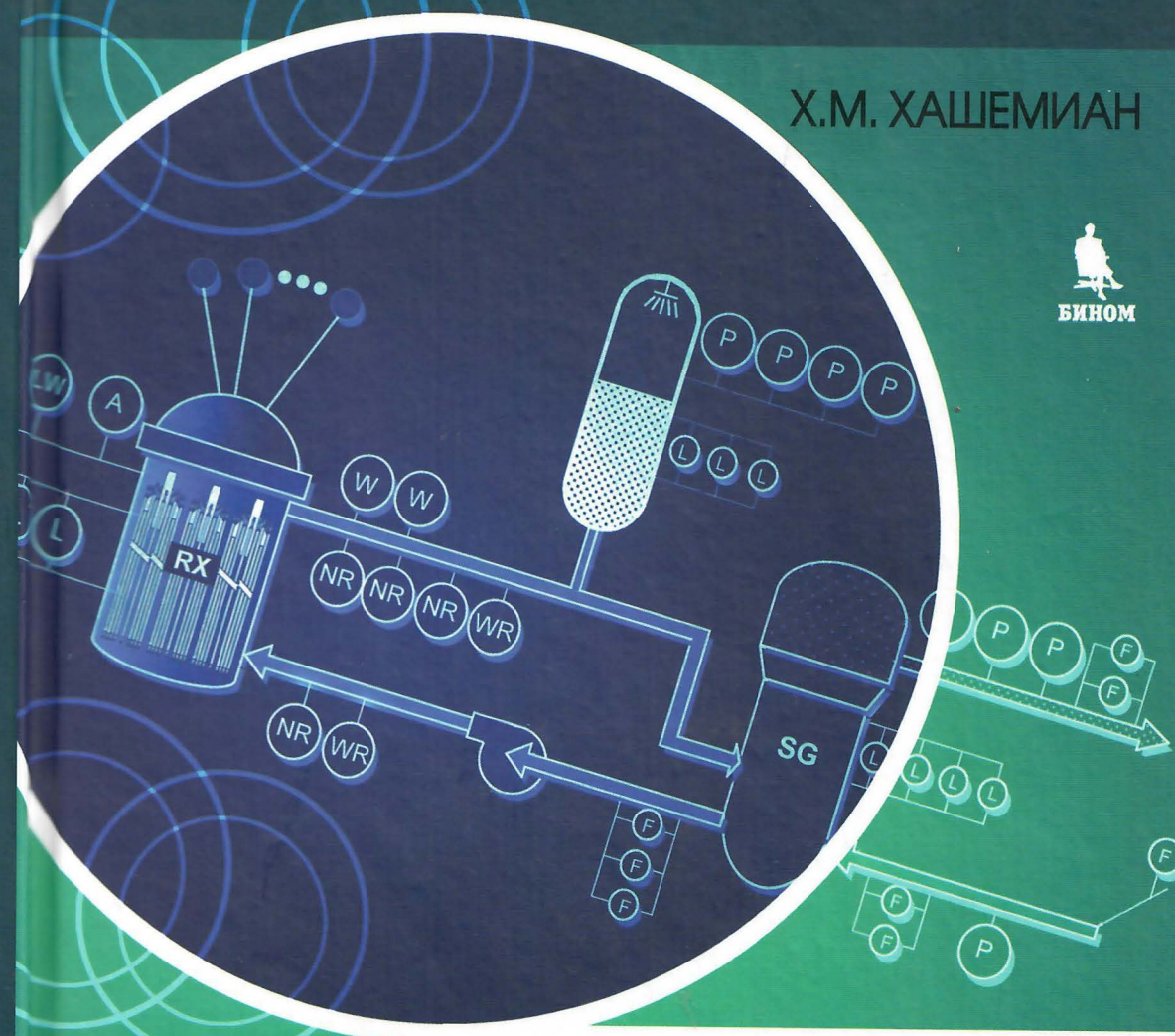
Х.М. ХАШЕМИАН

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

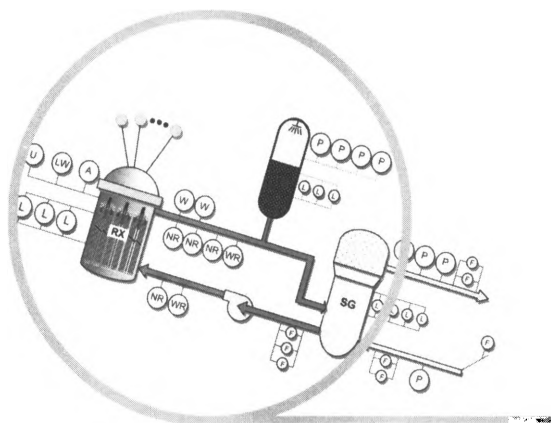
Х.М. ХАШЕМИАН



БИНОМ



ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ



H. M. Hashemian

Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants

With 131 Figures

 Springer

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Перевод с англ. под редакцией
канд. техн. наук А.Н. Косилова

Х.М. ХАШЕМИАН



БИНОМ

Издательство БИНОМ

Москва

2012

УДК 621.084.2

ББК 32.965.39

X29

Перевод с английского: В. Б. Фортаков

Хашемиан Х. М.

Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях. М.: Издательство Бином, 2012. — с., илл.

ISBN 978-5-9518-0481-5

Монография посвящена методам технического обслуживания и ремонта измерительных устройств АЭС. Особое внимание уделяется автоматизированным методам с использованием вычислительной техники и активным методам контроля, которые используют специальные тестовые сигналы для определения характеристик датчиков и диагностики неисправностей в их кабельных и измерительных линиях. Рассмотрены вопросы эксплуатации и обслуживания датчиков температуры и давления, применяемых на АЭС, а также активные и пассивные методы проверки характеристик этих датчиков без демонтажа после их установки на работающей станции.

ISBN 978-3-540-33703-2 (англ.)

© 2005 ISA The Instrumentation, Systems,
and Automation Society

ISBN 978-5-9518-0481-5 (Бином)

© Издательство БИНОМ, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ К ИЗДАНИЮ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Я высоко ценю предоставленную мне возможность обратиться к моим друзьям, коллегам и всем читателям русскоязычного издания моей книги. Я горжусь тем, что вы интересуетесь материалом, включенным в эту книгу, и буду рад ответить на ваши вопросы, которые можно задать по электронной почте, телефону, или факсу (адрес электронной почты hash@ams-corp.com, телефон в США +1 (865) 6911756, факс +1 (865) 6919344).

Контрольно-измерительные приборы и системы, применяемые на ядерных энергетических установках, имеют критически важное значение для обеспечения их безопасной и эффективной эксплуатации. К сожалению, связанные с этим методические и технические вопросы не всегда включаются в учебные планы институтов и университетов, и поэтому молодым инженерам ядерной отрасли нужна простая и практически ориентированная книга, чтобы дополнить знания, полученные в высшем учебном заведении. С другой стороны, я был уверен, что нужна книга, ориентированная на специалистов АЭС, где они могли бы найти материал, который можно использовать в своей повседневной деятельности. Вот почему в 2006 году я написал данную книгу, основанную на моем 30-летнем опыте разработки и испытаний контрольно-измерительных приборов и систем КИП на АЭС в разных странах. В этой книге вы познакомитесь с методами технического обслуживания и ремонта измерительных устройств АЭС, при этом особое внимание уделяется автоматизированным методам с использованием вычислительной техники

и активным методам контроля, которые используют специальные тестовые сигналы для определения характеристик датчиков и диагностики неисправностей в их кабельных и измерительных линиях. Рассмотрены также вопросы эксплуатации и обслуживания датчиков температуры и давления, применяемых на АЭС, а также активные и пассивные методы проверки характеристик этих датчиков без демонтажа, после их установки на работающей станции.

В 2005 году я подготовил книгу, посвященную промышленным датчикам и современным методам измерения их характеристик, изданную обществом измерительных устройств и автоматических систем (ISA), которая предваряет материал, включенный в данную публикацию. Русское издание этой книги было осуществлено издательством Бином в 2008 году под названием «Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности». Мой хороший друг и коллега Андрей Косилов совместно с Владимиром Фортаковым помогли обеспечить перевод обеих книг с английского, и я благодарен им за помощь, советы и прекрасное техническое редактирование этих публикаций при их переводе на русский язык.

Моя компания, Analysis and Measurement Services Corporation (AMS), проводит активную деятельность в области проектирования, тестирования и технического обслуживания измерительных систем на предприятиях атомной промышленности по всему миру, и нам уже представлялась возможность проведения работ на АЭС российской конструкции в ряде стран. Основное внимание в материале данной книги уделяется реакторам различных конструкций с водой под давлением, включая реакторы ВВЭР.

*Х.М. Хашемиан, PhD, DEng.
Ноксвилл, штат Теннесси, США
январь 2010 г.*

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	11	
БЛАГОДАРНОСТИ.....	12	
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	13	
ВВЕДЕНИЕ		
1.1. Базовая АЭС.....	15	
1.2. Мониторинг калибровки приборов технологического контроля в режиме on-line	16	
1.3. Динамические испытания датчиков давления и измерительных линий.....	18	
1.4. Обнаружение в режиме on-line загрязнения расходомеров Вентури . . .	21	
1.5. Измерение вибрации внутрикорпусных элементов реактора.....	23	
1.6. Обнаружение нарушений потока теплоносителя через активную зону	25	
1.7. Применения для реакторов CANDU	27	
1.8. Определение времени реакции температурных датчиков без их демонтажа	28	
1.9. Проверка кабелей по месту их расположения	29	
1.10. Автоматизированное техническое обслуживание.....	31	
КАК СОЗДАВАЛАСЬ ЭТА КНИГА		
2.1. Совместные НИОКР	36	
2.2. Правительственные программы НИОКР.....	38	
2.3. Программы НИОКР, проводимые компаниями-операторами электро- станций	40	
2.4. Руководящие документы МАГАТЭ	43	
2.5. Стандарты ISA и МЭК.....	44	
ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ КОНТРОЛЬНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ АЭС.....		47
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АЭС		
4.1. История создания ТДС	50	

4.2. ТДС ядерного класса	51
4.3. Термины, относящиеся к измерениям температуры на АЭС	61
4.4. Неисправности ТДС ядерного класса	66
4.5. Неисправности термопар на выходе из активной зоны	73

МЕТОД ПЕРЕКРЕСТНОЙ КАЛИБРОВКИ

5.1. Общие сведения	77
5.2. Основа метода	78
5.3. Источники данных для перекрестной калибровки	82
5.4. Подробный анализ данных перекрестной калибровки	87
5.5. Представление результатов перекрестной калибровки	93
5.6. Влияние поправок на результаты перекрестной калибровки	94
5.7. Программное обеспечение для автоматизации перекрестной калибровки	96
5.8. Погрешность результатов перекрестной калибровки	97
5.9. Подтверждение применимости метода перекрестной калибровки	102
5.10. Погрешности при перекрестной калибровке трехпроводных ТДС	105
5.11. Проверка применимости динамической перекрестной калибровки	108
5.12. Перекрестная калибровка термопар на выходе из активной зоны	111
5.13. Повторная калибровка датчиков-выбросов	113

ПРОВЕРКА ВРЕМЕНИ РЕАКЦИИ ТДС И ТЕРМОПАР

6.1. Цели проверки	121
6.2. Традиционные методы определения времени реакции	122
6.3. Метод РСПТ	123
6.4. Испытание методом самонагрева	167
6.5. Метод анализа шумов	171
6.6. Правила Комиссии по ядерному регулированию (NRC) США	174
6.7. Факторы, влияющие на время реакции	177
6.8. Выводы	180

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА АЭС

7.1. Типы датчиков давления	184
7.2. Типы и применение датчиков давления	185
7.3. Квалификация датчиков для применения на АЭС	188
7.4. Изготовители датчиков давления	192
7.5. «Умные» датчики давления	216
7.6. Оптоволоконные телеметрические датчики давления	218
7.7. Беспроводные телеметрические датчики давления	220

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ДАВЛЕНИЯ

8.1. Конструкция и монтаж измерительных линий	223
8.2. Измерительные линии датчиков внутри защитной оболочки реактора	224

8.3. Измерительные линии датчиков снаружи защитной оболочки реактора	227
8.4. Неисправности измерительных линий	227
8.5. Динамические характеристики измерительных линий	234
8.6. Краткие выводы	241

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

9.1. Описание метода анализа шумов	243
9.2. Метод анализа шумов — допущения	248
9.3. Метод анализа шумов — валидация	249
9.4. Метод «розового шума»	258
9.6. Точность метода анализа шумов	260
9.6. Опыт применения метода анализа шумов на АЭС	264
9.7. Потеря масла в датчиках давления на АЭС	267
9.8. Диагностика потери датчиком масла	270
9.9. Ухудшение времени реакции	273

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В РЕЖИМЕ ON-LINE

10.1. Закупорки измерительных линий	276
10.2. Воздух в измерительных линиях	280
10.3. Обнаружение утечек в измерительных линиях	281
10.4. Проблемы, вызываемые общими измерительными линиями	285

ОБ АВТОРЕ	287
-----------------	-----

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	288
-------------------------	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Статьи в научных журналах	293
Статьи в прочих журналах	294
Технические доклады	295
Публикации МАГАТЭ	295
Книги или главы в книгах	296
Международные публикации	296
Публикации в США	300
Патенты (выданные или рассматриваемые)	311

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Отраслевое техническое положение НИСВ-13	314
Руководство по перекрестной калибровке температурных датчиков сопротивления, используемых в системе защиты	314

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Регулирующее руководство 1.118 «Периодическое испытание систем электроснабжения и защиты»	324
Заявление о полезности и последствиях	328
Примечания	328

ПРИЛОЖЕНИЕ D

Информационное сообщение NRC 92-33 «Влияние демпферов на время реакции датчиков давления на АЭС»	330
--	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ E

Документы NRC по вопросу проблемы потери масла в датчиках давления на АЭС	334
---	-----

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	353
-----------------------------------	-----

Эта книга посвящается
моей прекрасной дочери
Никки Хашемиан

*Х. М. Хашемиан
Ноксвилл, Теннесси, США*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга написана для инженеров и техников служб контрольно-измерительных приборов и систем управления и защиты, а также для менеджеров АЭС. Основное внимание в ней уделено датчикам температуры и давления для технологических процессов и методам их калибровки и измерения временных характеристик. В книге приведены примеры типичных неисправностей, возникающих при измерениях температуры и давления на АЭС, и способов их устранения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает свою признательность всему техническому и административному персоналу корпорации AMS, которые помогли выпустить эту книгу. Благодарность, в частности, выражается г-же Е. Крамли за вклад в управление административными вопросами при подготовке книги и за сотрудничество с издательством; г-ну Д. Митчелу в знак признания его роли в подготовке иллюстраций, чертежей и фотографий, а также в координации усилий технических специалистов, которые помогали автору. Признательность также выражается независимому техническому редактору г-ну П. Бодину за его роль в редактировании этой книги и работе с корректурой.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AMS	Инженерная корпорация AMS (США)
ANSI	Американский национальный институт стандартов (США)
ASTM	Американское общество по испытаниям и материалам (США)
BWR	Реактор с кипящей водой
CANDU	Канадский тяжеловодный реактор
DOD	Министерство обороны (США)
DOE	Министерство энергетики (США)
EPRI	Институт исследований по электроэнергетике (США)
IEC	Международная электротехническая комиссия
IEEE	Институт инженеров по электротехнике и электронике (США)
ISA	Общество специалистов по измерительным устройствам и автоматическим системам (США)
LER	База данных NRC о происшествиях на АЭС
LMFBR	Быстрый реактор-размножитель с жидкометаллическим теплоносителем
LOCA	Авария с потерей теплоносителя
NASA	Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (США)
NIST	Национальный институт стандартов и технологий (США)
NMAC	Центр помощи EPRI по техобслуживанию АЭС (США)
NPAR	Программа исследований старения АЭС
NPRDS	База данных по надежности оборудования АЭС
NRC	Комиссия по ядерному регулированию (США)
ORNL	Окриджская национальная лаборатория (США)
PWR	Реактор водо-водяного типа под давлением
SBIR	Программа поддержки малого бизнеса в области проведения инновационных исследований
SER	Отчет об оценке безопасности
TECDOC	Обозначение технические отчетов МАГАТЭ
АЭС	Атомная электростанция
АЦП	Аналого-цифровое преобразование
БПД	Блок перепада давления

БПФ	Быстрое преобразование Фурье
ВВЭР	Водо-водяной энергетический реактор
ИКО	Измерение коэффициента отражения (метод)
КАЭ	Комиссариат по атомной энергии (Франция)
КИП	Контрольно-измерительные приборы
КСН	Коэффициент самонагрева
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
НИОКР	Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ПГ	Парогенератор
ПТС	Платиновый термометр сопротивления
РВА	Распределение вероятностей амплитуд
РСПТ	Реакция на ступенчатое изменение петлевого тока (метод)
СИ	Сопротивление изоляции
СКО	Среднеквадратичная ошибка
СПМ	Спектральная плотность мощности
СПТС	Стандартный платиновый термометр сопротивления
СУЗ	Система управления и защиты
ТДС	Температурный датчик сопротивления
ЭДС	Электродвижущая сила

ВВЕДЕНИЕ

Проверка рабочих характеристик датчиков и связанных с ними приборов, а также диагностика их неисправностей могут выполняться на атомных электростанциях (АЭС) на основе мониторинга сигналов датчиков во время работы АЭС. В главе 1 приводятся примеры такого подхода, дается обзор методов технического обслуживания с использованием компьютеров и активных методов контроля, при которых на датчики подаются сигналы для определения их характеристик и диагностики неисправностей в кабельных линиях и соединительных разъемах. В остальных главах книги основное внимание уделяется рассмотрению вопросов эксплуатации и обслуживания датчиков температуры и давления, применяемых на АЭС, а также активным и пассивным методам проверки характеристик этих датчиков без демонтажа после их установки на работающей станции.

1.1. Базовая АЭС

На рис. 1.1 изображена петля контура охлаждения реактора водо-водяного типа под давлением (PWR), который принят в книге в качестве референтной (базовой) установки. На рисунке показаны корпус реактора, первый контур охлаждения, парогенератор, компенсатор объема и второй контур охлаждения. Как правило, АЭС с реактором типа PWR включает в себя от двух до четырех таких петель охлаждения за исключением некоторых легководных реакторов российской конструкции с шестью петлями. Датчики, обычно устанавливаемые на АЭС с реактором типа PWR, обозначены на рис. 1.1 кружками; в частности, показаны датчики нейтронного потока, установленные с внешней стороны корпуса реактора; термопары на выходе из активной зоны, установленные внутри корпуса; температурные датчики сопротивления (ТДС) в трубопроводах горячего и холодного участков первого контура; а также датчики давления, уровня и расхода в первом и втором контурах.

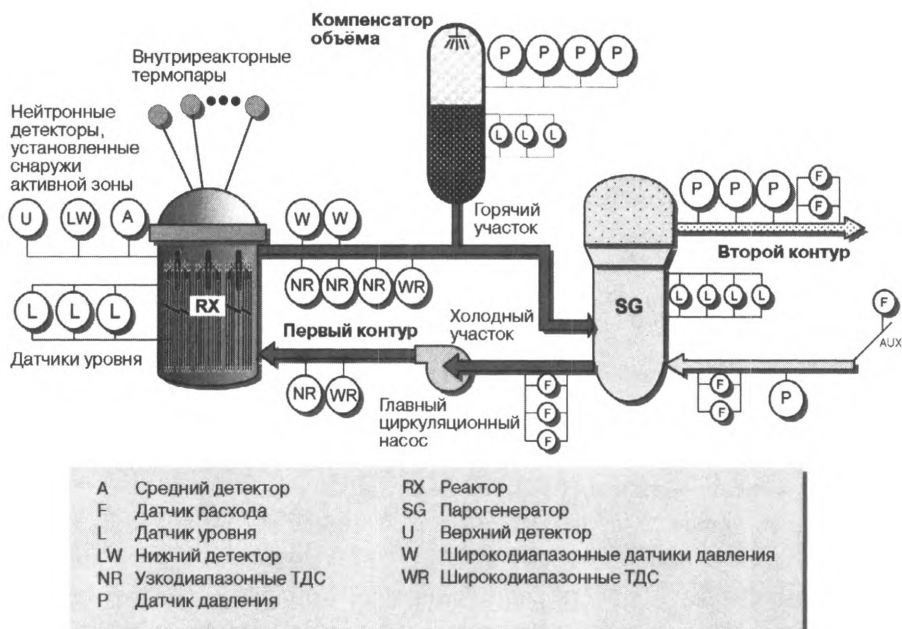


Рис. 1.1. Петля первого контура АЭС с реактором типа PWR и установленные в ней типичные датчики

Станция с реактором типа PWR выбрана для данной книги в качестве референтной АЭС потому, что на большинстве АЭС, существующих в мире в настоящее время, установлены реакторы именно этого типа. Помимо станций с реакторами типа PWR, большинство материала книги применимо также и к АЭС с другими типами обычных и усовершенствованных реакторов, таких как реакторы с кипящей водой (BWR), тяжеловодные канадские реакторы CANDU, реакторы PWR российской конструкции, называемые ВВЭР, реакторы-размножители на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (LMFBR) и высокотемпературные газо-охлаждаемые реакторы (HTGR).

1.2. Мониторинг калибровки приборов технологического контроля в режиме on-line

Из рис. 1.1 видно, что для измерения каждого технологического параметра на АЭС используют обычно от двух до четырех датчиков. Такое взаимодублирование датчиков улучшает работоспособность АЭС и позволяет избежать возникновения проблем с ее эксплуатацией или безопасностью при выходе из строя одиночного датчика. Хотя дублирование

приборов используется в конструкции АЭС главным образом для повышения безопасности и работоспособности станций, в последние годы в атомной энергетике это дублирование используется и для других целей, таких как проверка калибровки технологических приборов. Например, тестированию, называемому *перекрестной калибровкой*, подвергаются ТДС, измеряющие температуру теплоносителя в первичном контуре реакторов типа PWR, для проверки точности датчиков при старении.

В первом контуре охлаждения реактора типа PWR обычно устанавливают 16–32 ТДС. При изотермических условиях эти ТДС находятся в среде, имеющей практически постоянную температуру. Поэтому в изотермических режимах работы станции показания ТДС регистрируются при нескольких значениях температуры во время пуска и останова АЭС, и затем проводится сравнение их показаний для того, чтобы определить измерительные точки, являющиеся выбросами. После этого можно использовать данные перекрестной калибровки, полученные для трех или более заметно отличающихся друг от друга значений температуры, чтобы создать новую калибровочную таблицу для датчика, который был оценен как «датчик-выброс».

Для датчиков давления, не обладающих степенью взаимодублирования, характерной для ТДС, мониторинг в режиме on-line применяется для определения дрейфа калибровки. В этом методе сигналы на выходе датчиков усредняются или моделируются. На рис. 1.2 показаны данные мониторинга в режиме on-line, полученные от четырех датчиков-уровнемеров в парогенераторе АЭС с реактором типа PWR. Каждый график представляет собой отклонение сигнала соответствующего датчика от усредненного значения сигналов всех четырех датчиков. Представленные данные охватывают период времени в два года, что соответствует полной длительности кампании реактора. Из представленных данных следует, что эти датчики не испытывают калибровочного дрейфа, и поэтому их не надо подвергать повторной калибровке. Этот пример иллюстрирует принцип мониторинга калибровки приборов технологического контроля в режиме on-line на АЭС.

Данные рис. 1.2 относятся к проверке калибровки четырех датчиков в одной точке калибровочной кривой. Чтобы проверить калибровку датчика в более широком диапазоне значений, данные on-line мониторинга регистрируют не только во время эксплуатации станции, но и во время периодов пуска и останова. На рис. 1.3 показаны результаты мониторинга в режиме on-line для датчика давления в виде функции его

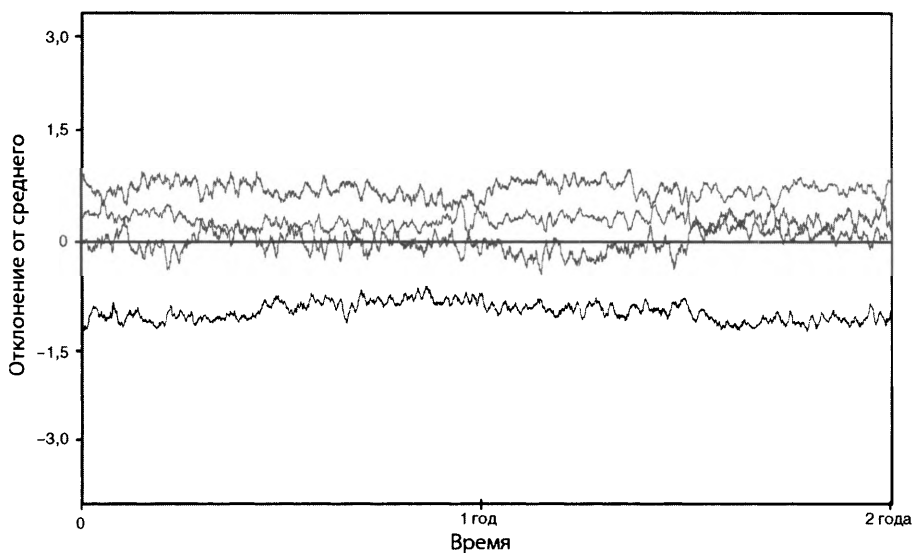


Рис. 1.2. Мониторинг в режиме on-line сигналов четырех взаимодублируемых датчиков

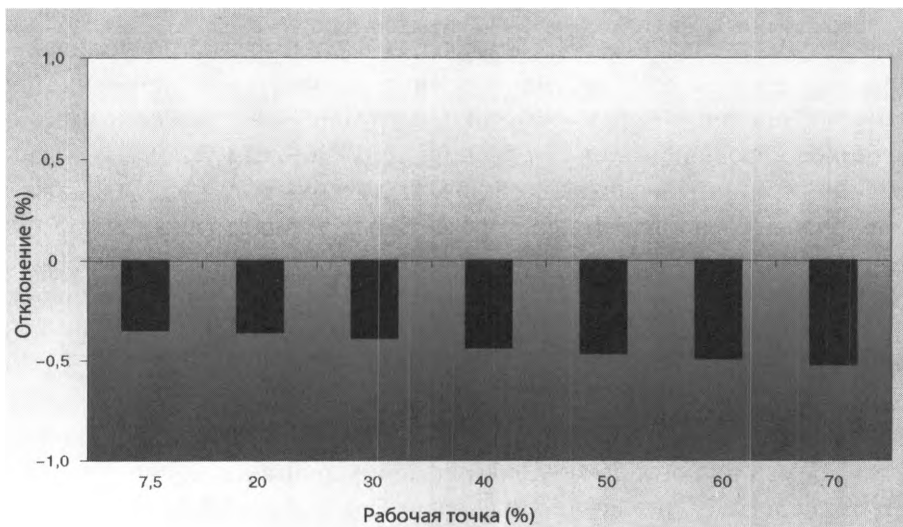


Рис. 1.3. Результаты проверки калибровки датчика в широком диапазоне

рабочего диапазона. Видно, что дрейф калибровки датчика не превышает 0,5% от его диапазона при работе в области от 7,5 до 70% рабочего диапазона.

1.3. Динамические испытания датчиков давления и измерительных линий

Мониторинг датчиков в режиме on-line с целью динамических испытаний, в том числе и телеметрических, требует высокой скорости регистрации данных. В верхней части рис. 1.4 показан уровнемер, установленный на АЭС в конце измерительной линии. На этой АЭС один раз за кампанию реактора в режиме on-line проводятся измерения с целью

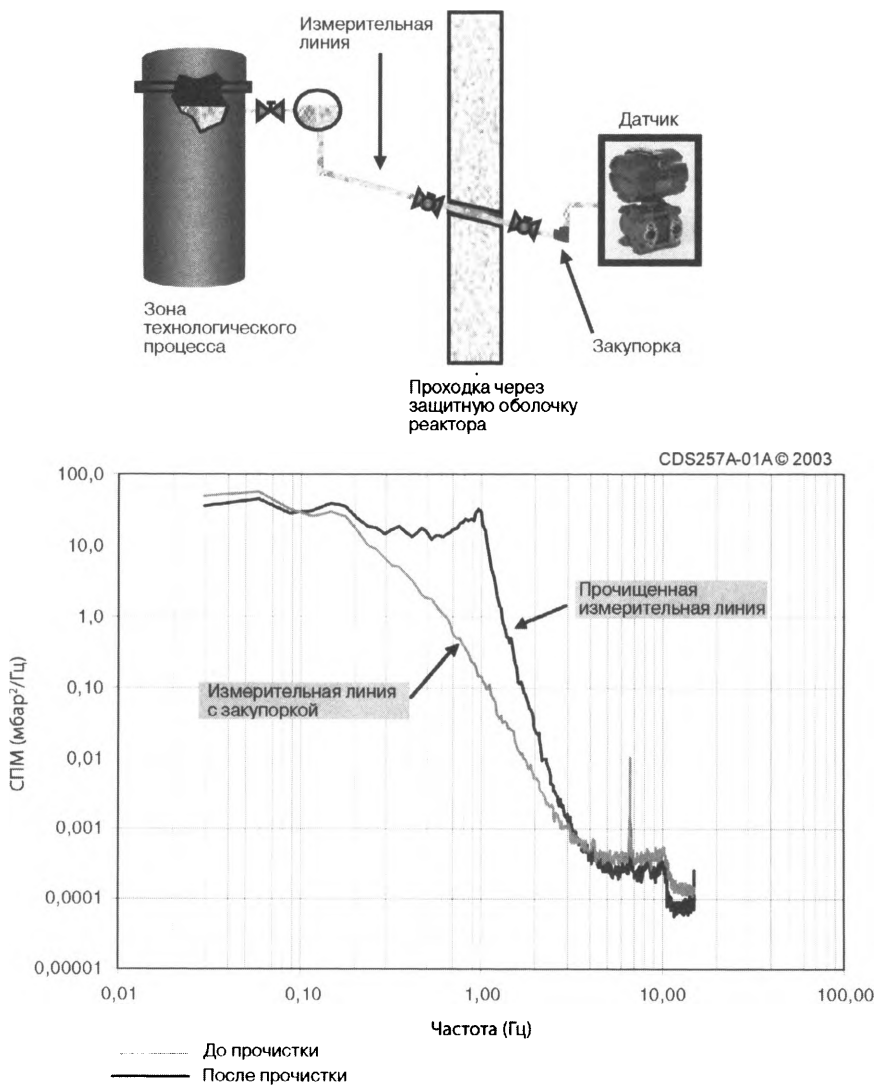


Рис. 1.4. Обнаружение в режиме on-line закупорок в измерительных линиях

определения времени реакции каждого датчика и выявления существенных закупорок в измерительных линиях давления. В приводимом примере данные телеметрического датчика регистрировались каждую миллисекунду; собранные данные затем анализировались для определения его динамической характеристики.

Для анализа применялась обработка данных при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ) с целью получить спектральную плотность мощности (СПМ), которая затем использовалась для определения его времени реакции. Вначале обнаружилось, что датчик был медленнее, чем ожидалось, и сравнение его СПМ с реперным значением СПМ, полученным ранее, дало неудовлетворительный результат. Поэтому персонал АЭС уведомили, что либо реакция датчика была замедленной, либо ведущие к нему измерительные линии были частично закупорены, либо имело место и то, и другое. В результате, группа технического обслуживания АЭС проверила во время останова станции датчик и его измерительные линии и обнаружила, что загрязнения воды первичного контура привели к частичной закупорке одной из измерительных линий датчика. В результате данная линия подверглась продувке, и динамические испытания повторили, чтобы проверить восстановление работоспособности. В нижней части рис. 1.4 приводятся графики СПМ датчика до и после удаления закупорки измерительной линии. Ясно видно, что закупорка ухудшила динамическую характеристику датчика и что эту неисправность удалось устранить при помощи продувки системы.

На АЭС часто наблюдались случаи закупорок, пустот и утечек из измерительных линий давления. На рис. 1.5 представлены данные, полученные из базы данных LER (Licencee Event Report), основанной на отчетах о происшествиях операторов лицензированных установок. Эта база данных поддерживается Комиссией по ядерному регулированию (NRC) США с целью слежения за отказами основного оборудования на АЭС, включая датчики важных для безопасности параметров давления, уровня и расхода. Данные рис. 1.5, охватывающие период в 10 лет, показывают, что закупорки, пустоты и утечки явились причиной почти 70% неисправностей измерительных линий, связанных со старением оборудования.

По этой причине на АЭС с целью обеспечения безопасной и эффективной работы станции проводится тестирование динамических характеристик датчиков давления совместно с их измерительными линиями.



Рис. 1.5. Результаты поиска в базе данных LER

1.4. Обнаружение в режиме on-line загрязнения расходомеров Вентури

Расход питательной воды во втором контуре реакторов типа PWR традиционно измеряют при помощи расходомеров, работающих по принципу трубки Вентури. Типичной неисправностью, присущей расходомерам Вентури, является загрязнение измерительных элементов. Эти загрязнения уменьшают диаметр чувствительного элемента расходомера, что приводит к завышенным показаниям расхода питательной воды. Последующий калориметрический расчет мощности, использующий завышенное значение расхода, вызванное загрязнениями расходомера Вентури, приводит к завышению показаний мощности реактора, при этом теряется возможность эксплуатации АЭС на реальном разрешенном уровне мощности. Накопленные данные свидетельствуют о том, что неточности измерения расхода, вызываемые загрязнениями расходомеров Вентури, могут приводить к снижению энерговыработки на АЭС почти на 3%. Из-за этой проблемы на многих станциях устанавливаются ультразвуковые расходомеры, не страдающие неисправностями, вызываемыми загрязнениями. Такие расходомеры в большинстве случаев отличаются также более высокой точностью по сравнению с датчиками Вентури и одобрены Комиссией по ядерному регулированию США в качестве средства, позволяющего повысить выработку энергии станцией на величину до 3%.

Чтобы воспользоваться возможностью повысить энерговыработку на 3%, станциям приходится затрачивать около 2 млн долларов (по ценам 2006 года) на установку одного ультразвукового датчика расхода. Такое капиталовложение, конечно, оправдано, и на многих АЭС ультразвуковые расходомеры используются для уменьшения неточности измерений расхода питательной воды и увеличения таким образом энерговыработки до разрешенного значения. С другой стороны, при помощи ультразвуковых расходомеров на некоторых станциях было установлено, что датчики расхода с элементами Вентури давали показания, занижающие величину расхода по сравнению с реальной. На этих АЭС приходилось снижать уровень мощности после установки ультразвуковых расходомеров. В целом число АЭС, где установка ультразвуковых датчиков привела к повышению энерговыработки, было намного выше, чем число станций, где пришлось понизить мощность.

Неисправности, вызываемые загрязнением элементов Вентури, можно обнаруживать при помощи мониторинга в режиме on-line, используя сигналы от датчиков до и после места расположения элемента Вентури, а также от датчиков, расположенных в других местах на станции. На рис. 1.6 показан пример результатов мониторинга on-line для определения степени загрязнения расходомеров Вентури и его влияния на мощность реактора. Представленные данные охватывают период в 500 дней, что соответствует полной длительности кампании реактора на



Рис. 1.6. Пример результатов мониторинга в режиме on-line для обнаружения загрязнений расходомеров Вентури

АЭС, где были получены эти данные. На рис. 1.6 представлены два графика: один отражает мощность реактора, вычисленную при помощи аналитической модели с использованием данных мониторинга в режиме on-line, а второй — мощность реактора, показываемую приборами станции. Видно, что расхождение между показываемой и вычисленной (реальной) мощностями начинается примерно после первых 100 дней кампании реактора. В течение 500 дней превышение показываемой мощности над реальной увеличивается до 2,5%. Как правило, работа АЭС на мощности свыше 100% не разрешена, поэтому подобная ошибка в показаниях мощности реактора в 2,5% обычно приводит к снижению разрешенной энерговыработки станции на ту же величину.

1.5. Измерение вибрации внутрикорпусных элементов реактора

На рис. 1.7 в упрощенной форме представлено поперечное сечение реактора типа PWR, включая корпус реактора, корзину активной зоны, тепловыделяющие сборки и тепловую защиту. С внешней стороны корпуса реактора показаны четыре нейтронных детектора, обозначенные NI-41, NI-42, NI-43 и NI-44. Эти детекторы называют *внекорпусными нейтронными детекторами*, *нейтронными датчиками* или *датчиками нейтронного потока в диапазоне работы на мощности*.

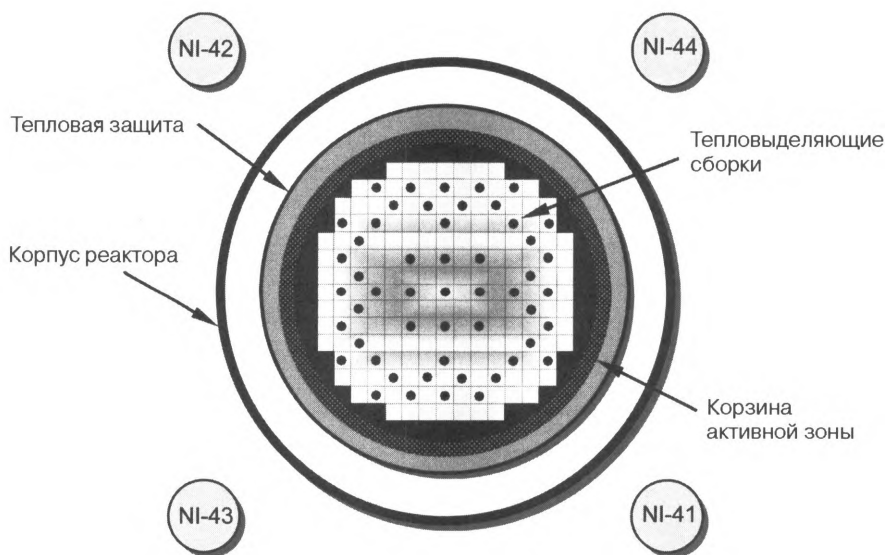


Рис. 1.7. Поперечное сечение реактора типа PWR

Основная цель их использования заключается в измерении нейтронного потока в качестве средства слежения за мощностью реактора. Кроме того, эти детекторы могут использоваться для измерения вибрационных характеристик корпуса реактора и его внутрикорпусных устройств.

Обычно вибрационные датчики (например, акселерометры) располагают на крышке и на днище корпуса реактора, чтобы инициировать сигнал тревоги, если возникнет чрезмерная вибрация главных компонентов реакторной системы. Было установлено, что нейтронные датчики более чувствительны к вибрации корпуса реактора и его внутренних устройств, чем акселерометры. Это связано с тем, что частота вибрации внутриреакторных устройств обычно ниже 30 Гц, что легче зарегистрировать при помощи нейтронных детекторов, а не акселерометров. Акселерометры подходят для мониторинга вибраций более высокой частоты.

На рис. 1.8 представлена спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала от нейтронного детектора на реакторе типа PWR. Эта СПМ содержит характерные вибрационные признаки (т.е. амплитуду и частоту) реакторных компонент, в том числе корпуса реактора, корзины активной зоны, тепловыделяющих сборок, тепловой защиты и т.д. В области 25 Гц она отражает даже характерный признак главного циркуляционного

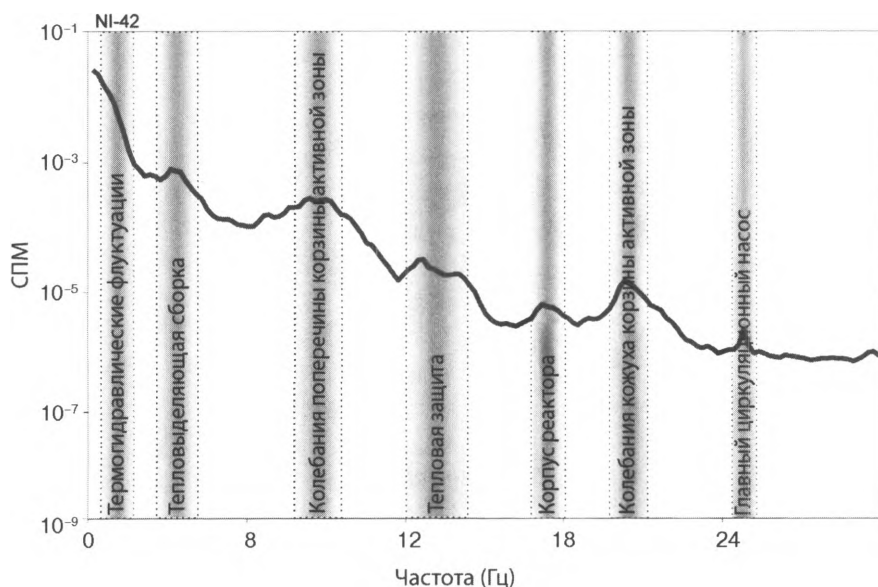


Рис 1.8. СПМ с характерными признаками вибрации реакторных компонентов

насоса, вращающегося со скоростью 1500 об./мин, что соответствует 25 Гц. Совершенно очевидно, что нейтронные детекторы эффективно регистрируют характерные признаки вибрации всех существенных компонентов реакторной системы.

1.6. Обнаружение нарушений потока теплоносителя через активную зону

На рис. 1.1 было показано, что сверху активной зоны реактора типа PWR находятся термопары. Эти термопары, называемые *термопарами на выходе из зоны*, обычно используются для слежения за температурой теплоносителя на выходе из активной зоны. Их можно также использовать в сочетании с внекорпусными нейтронными детекторами для мониторинга расхода теплоносителя через реакторную систему. В частности, изучая взаимную корреляцию сигналов от внекорпусных нейтронных детекторов и от термопар на выходе из зоны, можно определить время, за которое теплоноситель реактора проходит от места установки нейтронных детекторов до термопар на выходе из зоны (см. рис. 1.9). Полученный результат, называемый *временем прохождения* (τ), можно использовать вместе с геометрическими параметрами активной зоны для оценки нарушений потока теплоносителя, обнаружения закупорок и проведения другой диагностики.

Измерения нейтронного потока на АЭС с реакторами типа BWR производятся обычно при помощи вертикального набора внутрикорпусных нейтронных детекторов (рис. 1.10), называемых *локальными датчиками мощностного диапазона (ЛДМД)*. Посредством перекрестной корреляции пар сигналов ЛДМД можно составить реперное распределение потока теплоносителя вдоль активной зоны и с его помощью выполнять мониторинг потока для целей диагностики. На рис. 1.10 приведена зависимость фазы от частоты для сигналов от двух ЛДМД (датчики В и С), установленных в реакторе типа BWR. Эта зависимость линейная и, разделив величину наклона ее графика на 360, можно получить время прохождения теплоносителя между выбранными ЛДМД.

Сигналы от ЛДМД могут использоваться в реакторах типа BWR не только для мониторинга потока теплоносителя через активную зону, но и для обнаружения вибраций каналов, где установлены датчики, и тепловыделяющих сборок, измерения запаса устойчивости реактора и проведения других видов диагностики.

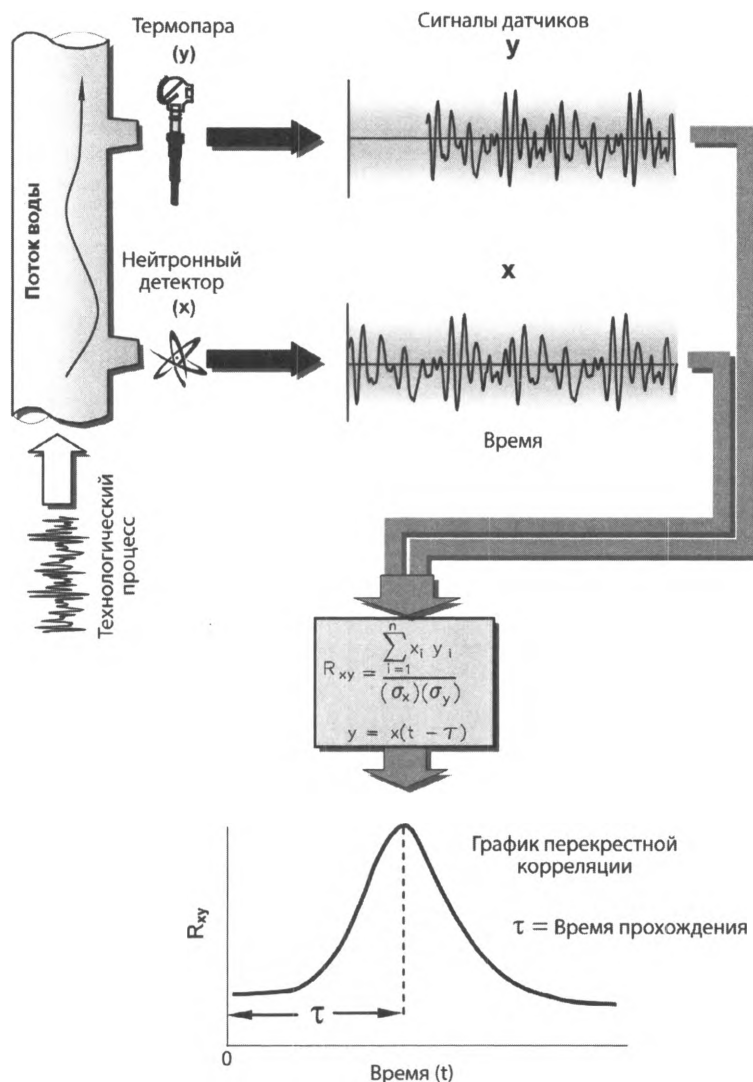


Рис. 1.9. Пояснение принципа перекрестной корреляции, использующей нейтронный детектор и термопару на выходе из зоны для определения времени прохождения (τ)

1.7. Применения для реакторов CANDU

В реакторах CANDU нейтронные детекторы размещаются в горизонтальных и вертикальных каналах, проходящих через реактор, и используются для измерений нейтронного потока и мониторинга мощности реактора. В дополнение к измерению нейтронного потока эти детекторы могут быть использованы для измерения характерных вибрационных

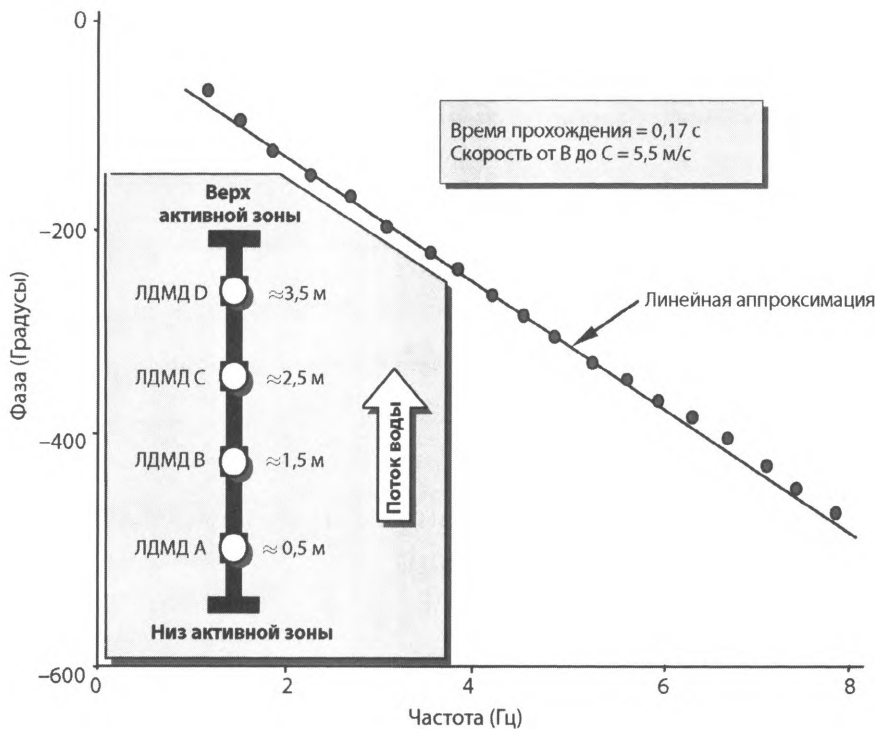


Рис. 1.10. Диагностика потока теплоносителя через активную зону реактора типа BWR с помощью штатного набора внутрикорпусных нейтронных детекторов

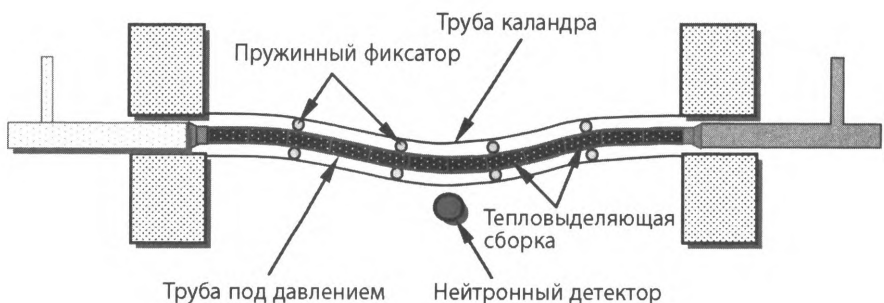


Рис. 1.11. Прогиб топливного канала в реакторе CANDU

характеристик внутрикорпусных устройств реактора. Например, в некоторых давно эксплуатирующихся реакторах CANDU наблюдался прогиб топливных каналов, изображенный на рис. 1.11. Такой прогиб происходит, очевидно, из-за того, что вибрация приводит к ослаблению

пружинных фиксаторов, находящихся внутри канала (показано на рис. 1.11), вследствие чего они смещаются с мест установки.

Из-за собственного прогиба топливный канал может войти в контакт с другими компонентами активной зоны, приводя к таким последствиям, как нарушение герметичности топлива. Эксплуатационный персонал станции может использовать сигнал нейтронного детектора, изображенного на рис. 1.11, чтобы определить, не прогнулся ли топливный канал, особенно если для целей сравнения были заранее определены его реперные вибрационные характеристики. Нейтронные детекторы в реакторах CANDU могут быть также использованы для измерения вибрации других внутриреакторных компонентов, таких как горизонтальные и вертикальные трубы, в которых размещены нейтронные датчики.

1.8. Определение времени реакции температурных датчиков без их демонтажа

Пассивная диагностика, основанная на сигналах от штатных датчиков, не является единственной формой тестирования измерительных устройств АЭС. Ниже приводится также описание методов тестирования без демонтажа, использующих активные тестовые сигналы, подаваемые на датчик для измерения эксплуатационных характеристик оборудования или для целей диагностики и обеспечения возможности обнаружения отклонений от штатного режима эксплуатации. Например, время реакции некоторых ТДС, термопар и нейтронных детекторов можно измерить, подавая на них испытательный сигнал через соединительные провода датчиков. Это тестирование может проводиться дистанционно с приборных стоек, расположенных в помещениях пульта управления станцией. Более того, так как эти испытания могут выполняться во время работы станции, возможно измерение фактических значений времени реакции датчиков в рабочих условиях.

На время реакции ТДС, установленных в первичных контурах охлаждения АЭС, в частности, влияют скорость, температура и давление среды, которая их окружает. Поэтому время их реакции должно измеряться при нормальных, или близких к нормальным, условиях эксплуатации. Для этой цели в середине 1970-х годов был разработан метод *реакции на ступенчатое изменение петлевого тока* (РСПТ). В этом методе используется ступенчатое изменение величины тока, пропускаемого через чувствительный элемент ТДС, приводящее к внутреннему разогреву датчика. Такое тестирование ТДС производится путем его присоединения

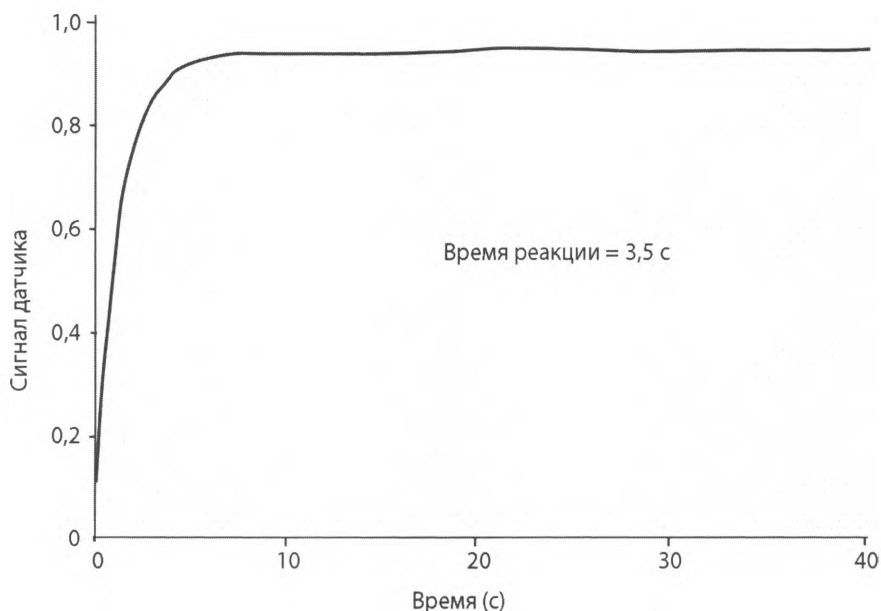


Рис. 1.12. Типичный переходный сигнал РСПТ для ТДС на АЭС

к мосту сопротивлений Уитстона. В схему моста включен переключатель, позволяющий изменять ток, пропускаемый через ТДС, с 1–2 мА до 30–50 мА для тестирования по методу РСПТ. Происходящий при этом внутренний разогрев датчика приводит к переходному процессу увеличения сопротивления ТДС, выражающегося в экспоненциальном изменении выходного сигнала моста Уитстона. Типичный переходный сигнал, получаемый при использовании метода РСПТ для тестирования ТДС на АЭС, показан на рис. 1.12. Этот сигнал регистрируется и анализируется с целью определить время реакции ТДС.

1.9. Проверка кабелей по месту их расположения

Испытания кабелей (включая соединительные муфты, сращивания и другие части кабеля) проводятся на АЭС путем изучения изменения импеданса по длине кабеля. В частности, для испытания и определения причин неисправностей кабелей на АЭС применяется метод *измерения коэффициента отражения* (ИКО). В этом методе по кабелю посылается электрический сигнал и его отражение регистрируется в виде функции времени или расстояния, проходимого сигналом по кабелю (рис. 1.13). Получаемый график характеризует изменение импеданса кабеля и позволяет определять места таких отклонений от нормальных

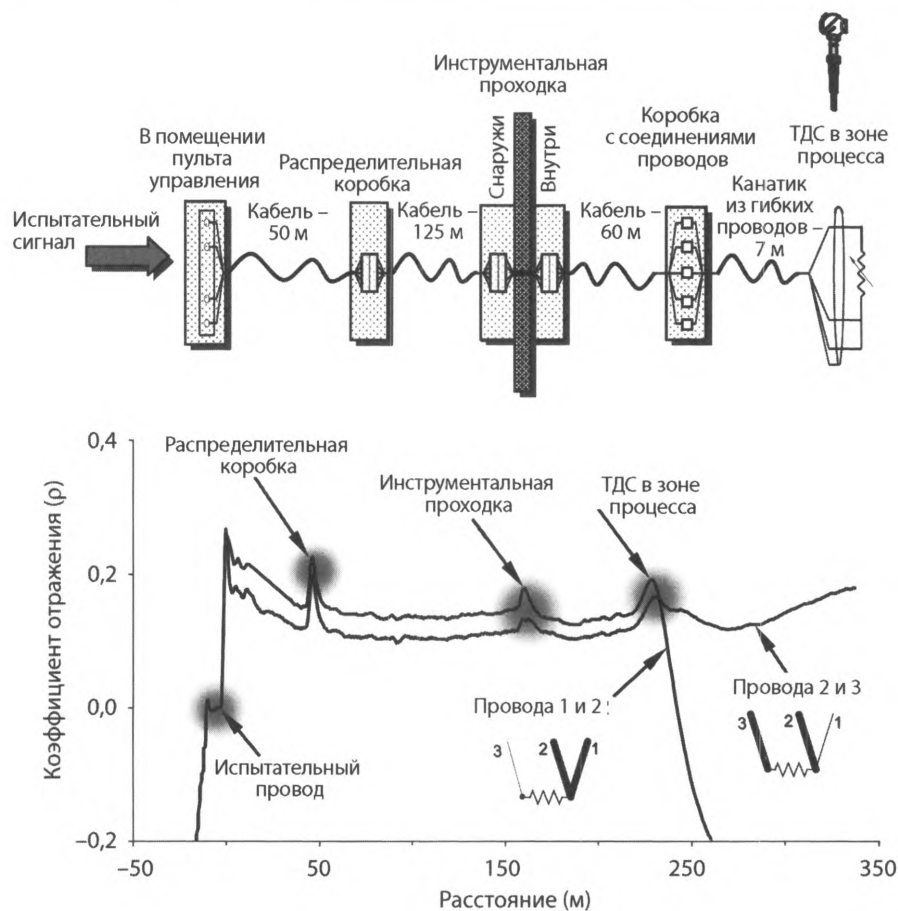


Рис. 1.13. Схема кабельных соединений ТДС на АЭС и соответствующие коэффициенты отражения

его свойств, как наличие разрыва, короткого замыкания или шунтирования как по длине кабеля, так и в устройстве, установленном на его конце (например, ТДС, термопаре или нейтронном детекторе).

Метод ИКО применяется для диагностики кабелей на АЭС, особенно если для сравнения имеются их реперные графики импедансов. Например, как только на АЭС получают нестандартный сигнал от таких датчиков, как ТДС, термопара или нейтронный детектор, то выясняют, внутри или снаружи защитной оболочки возникла неисправность? Если неисправность находится внутри защитной оболочки, возникает второй вопрос: касается ли она кабельной линии или конечного устройства (т.е. датчика или детектора)?

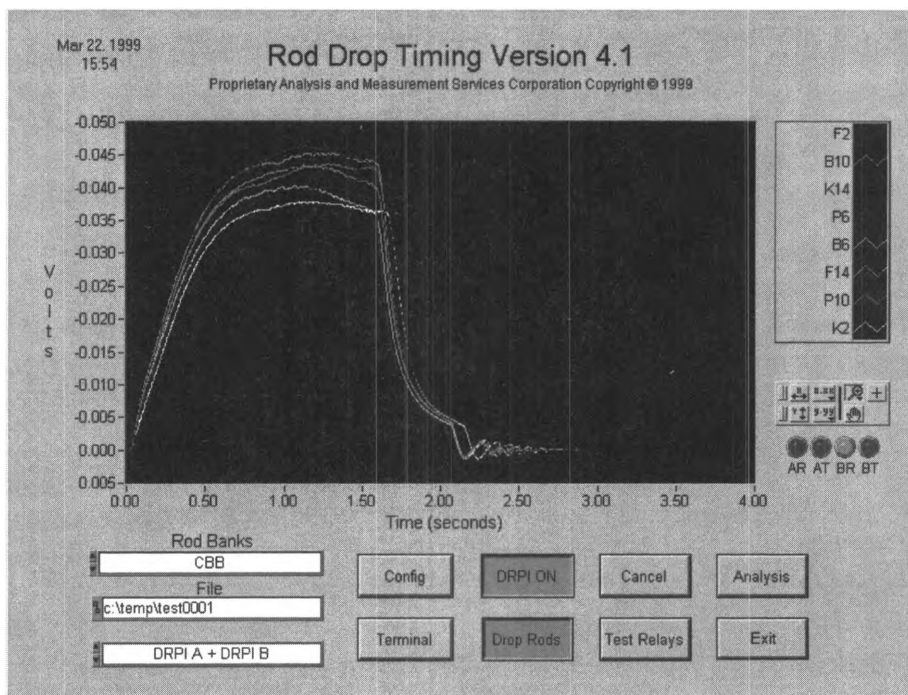
Метод ИКО, используемый вместе с измерениями других электрических величин, таких как сопротивление (R), емкость (C) и индуктивность (L), часто может помочь найти ответы на эти вопросы. Величины сопротивления, емкости и индуктивности могут быть измерены при помощи одного и того же оборудования, называемого «тестером LCR».

Совместное использование методов ИКО, РСПТ и измерений тестером LCR показало свою высокую эффективность для разграничения неисправностей кабельных линий от неисправностей, возникающих в датчиках, таких как ТДС, термпары и тензометры. Что касается других датчиков, использующихся на АЭС, таких как нейтронные детекторы, то для проверки целостности кабелей и работоспособности конечного устройства, в данном случае нейтронного детектора, используется сочетание метода ИКО, измерений LCR и метода анализа шумов.

1.10. Автоматизированное техническое обслуживание

В последние годы на АЭС стали широко использовать автоматизированное техническое обслуживание. Например, при нормальной работе станций с реакторами типа PWR на полной мощности значительное число стержней СУЗ обычно находится над активной зоной. Если происходит что-то, требующее быстрого останова реактора, эти стержни внезапно сбрасываются, чтобы, падая под действием силы тяжести в зону, заглушить реактор как можно быстрее. По этой причине критическим параметром часто является время, которое занимает падение стержней из верхнего положения до низа активной зоны. Поэтому для большинства станций с реакторами типа PWR измерение времени падения стержней СУЗ должно обязательно производиться после каждого останова станции для перегрузки и проведения любого технического обслуживания, при котором требуется удаление крышки реактора.

Измерение времени падения стержней традиционно проводилось для каждого стержня по отдельности, регистрируя на самописце сигнал от индикатора позиции соответствующего стержня. При помощи компьютерной системы сбора и анализа данных можно обеспечить одновременный сброс всех стержней и измерить времена их падения в автоматическом режиме. Обычно измерение проводится при одновременном сбросе одной группы стержней, включающей до девяти стержней. На рис. 1.14 показаны результаты измерения времен падения для группы стержней реактора типа PWR. На графиках показаны сигналы от катушек указателей положения стержней в виде функций от времени, от начала падения стержней из их верхнего положения до достижения



а) Компьютерный формат данных для группы восьми стержней СУЗ



б) Расчет времени падения стержня

Рис. 1.14. Результаты измерения времени падения стержней СУЗ для группы из восьми стержней

низа активной зоны и входа в амортизационные секции своих направляющих труб. Графики используются для измерения времени падения стержня, а также для диагностики проблем, касающихся его движения (например, заклинивания или неполного ввода стержня).

Так как операции по измерению времени падения стержней обычно приходится на время, критическое для работ по пуску станции, то автоматизация измерений для групповых испытаний стержней позволяет сэкономить несколько часов этого времени и приносит станциям большую экономическую выгоду.

Для запуска реактора или изменения его мощности стержни СУЗ вводятся в активную зону или выводятся из нее посредством электромеханической системы привода стержней СУЗ. В реакторах типа PWR конструкции Вестингауз такой привод включает в себя три соленоида, управляющие захватами, которые обеспечивают удержание и (или) перемещение стержней; эти соленоиды называют *соленоидом стационарного захвата*, *подвижным соленоидом* и *подъемным соленоидом*. Соленоид стационарного захвата удерживает стержень в нужном положении до тех пор, пока подвижный соленоид не зафиксируется на нем при помощи защелки. После этого подъемный соленоид перемещает весь узел. Движения трех соленоидов должны происходить своевременно и в правильной последовательности, иначе стержень может непреднамеренно упасть в активную зону. Для обеспечения своевременности и правильной последовательности перемещений стержней СУЗ производится мониторинг токов, которые подаются на соленоиды, времена и последовательность их подачи измеряются после каждой перегрузки или техобслуживания, при котором заграживаются приводы стержней СУЗ. Ранее тестирование приводов на своевременность и правильность последовательности перемещений производилось для каждого стержня в отдельности, полученные данные регистрировались на самописце и визуально изучались с целью проверки надлежащего функционирования приводов. Более того, временные параметры операций рассчитывались вручную. Очевидно, что на эту процедуру уходило много времени, и она в конце концов была автоматизирована. В результате, при помощи тестирования с использованием компьютерных технологий несколько приводов стержней СУЗ теперь проверяются одновременно и показатели своевременности и правильности последовательности их перемещений рассчитываются автоматически. На рис. 1.15 показаны результаты автоматического тестирования одного из приводов стержней СУЗ и расчет временных характеристик его работы.

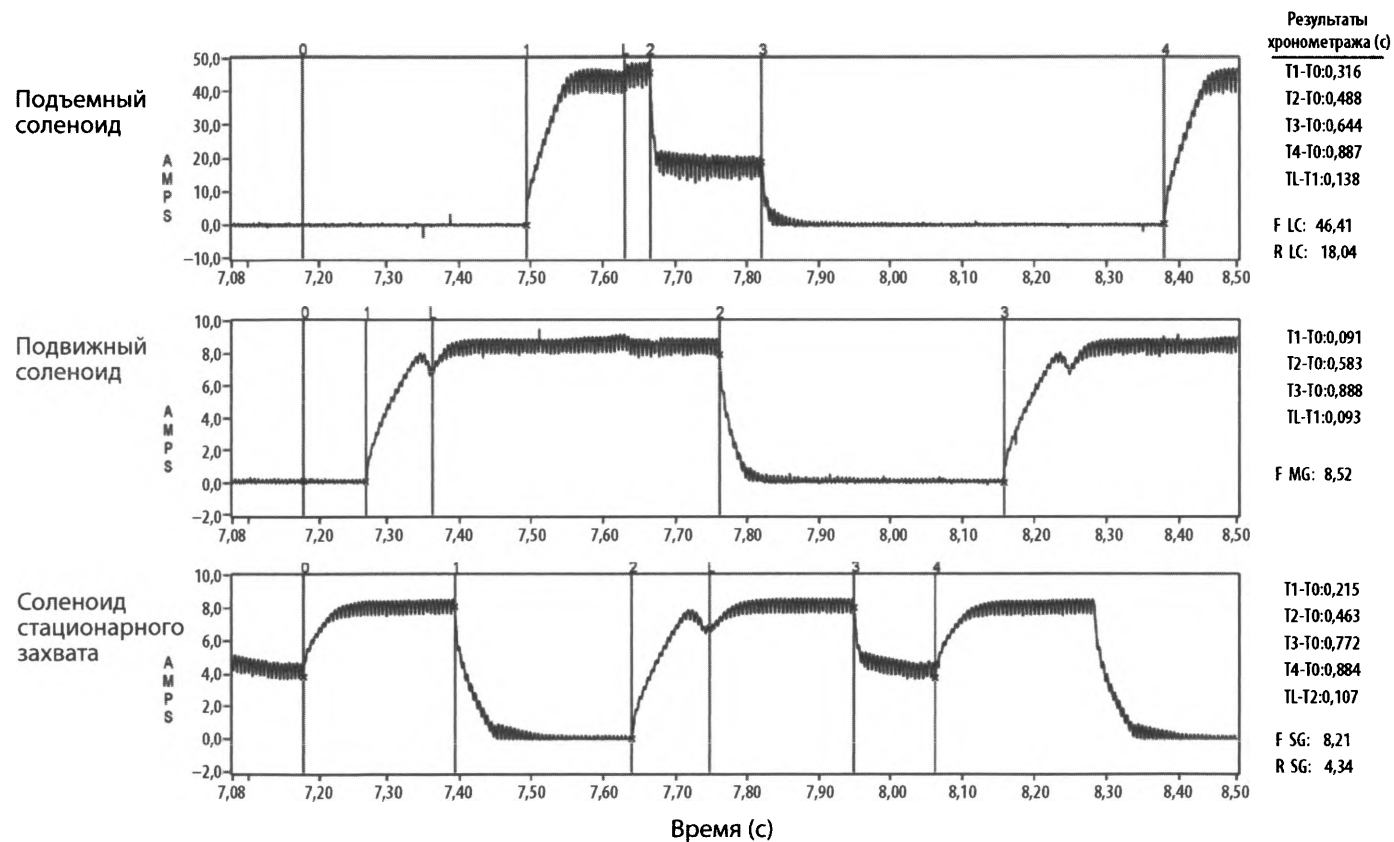


Рис. 1.15. Результаты автоматического тестирования привода стержней СУЗ и расчет временных характеристик его работы

КАК СОЗДАВАЛАСЬ ЭТА КНИГА

При создании книги использованы материалы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) и результаты работ по метрологии и диагностике, выполнявшихся автором и сотрудниками корпорации AMS (Analysis and Measurement Services Corporation) с 1975 по 2006 годы. Книга дополняет предыдущую публикацию автора «Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности», изданную американским Обществом специалистов по измерительным устройствам и автоматическим системам (ISA) в 2005 году [1], в которой изложены основы систем измерения технологических процессов¹. Основное внимание в данной книге уделено тестированию и диагностике систем измерения технологических параметров, при этом использованы реальные примеры и данные, полученные на практике при проведении испытаний и диагностических измерений на различных промышленных предприятиях, в аэрокосмической промышленности, на атомных электростанциях и в условиях моделирования технологических процессов в лабораториях AMS.

Работы, положенные в основу книги, выполнялись в сотрудничестве с Окриджской национальной лабораторией (ORNL), Университетом Теннесси в Ноксвилле, Институтом исследований по электроэнергетике (EPRI) и его центром поддержки по техобслуживанию АЭС (NMAC), французской компанией Electricite de France (EdF), лабораториями Комиссариата по атомной энергии (КАЭ) Франции в Сакле,

¹ Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности. М.: Издательство Бином, 2008.

Комиссией по ядерному регулированию (NRC) США, Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (NASA), Военно-воздушными силами США и энергетическими компаниями многих стран, в которых эксплуатируются АЭС. Кроме этого, в рамках сотрудничества с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), Международной электротехнической комиссией (МЭК) и американским обществом ISA, автор смог внести свой вклад в разработку нескольких национальных и международных стандартов и руководств по испытанию систем измерения и управления для АЭС. Работы, выполнявшиеся в рамках этого сотрудничества, также нашли свое отражение в данной книге.

В Приложении А приводится список литературы, в который включены многие технические доклады, журнальные статьи, отчеты, книги и главы из книг, посвященные вышеуказанным видам деятельности.

2.1. Совместные НИОКР

В начале 1970-х годов отдел приборов для измерений и управления лаборатории ORNL участвовал в нескольких проектах по разработке нового оборудования и методов тестирования и диагностики для АЭС. Например, в то время в США строился реактор Клинч-Ривер типа LMFBF и лаборатория ORNL осуществляла техническую поддержку проекта этого реактора. Для измерения температуры жидкого натрия, используемого в качестве теплоносителя, обычно применяются термопары. Считается, что эти термопары обладают малым временем реакции и поэтому могут обеспечить достаточно быстрые измерения температуры в случае нестандартного переходного процесса. В этой связи, лаборатории ORNL была поручена разработка метода измерения динамической характеристики термопар, находящихся в жидкометаллической среде, без их демонтажа. Инженеры лаборатории пришли к выводу, что методом, наиболее подходящим для этой цели, являлся первоначально предложенный NASA метод РСПТ, и в ORNL началась разработка аппаратуры на основе этого метода.

Тем временем Комиссия по ядерному регулированию NRC выпустила Регулирующее руководство (Regulatory Guide) 1.118, рекомендовавшее измерять на АЭС с реакторами типа PWR время реакции ТДС, связанных с обеспечением безопасности. Благодаря этой рекомендации EPRI счел целесообразным открыть финансирование проекта в Университете Теннесси, чтобы адаптировать метод РСПТ для ТДС. Автор этой книги, бывший тогда аспирантом этого университета, в рамках

проекта EPRI и с помощью других участников проекта разработал прототип оборудования, включающего приборы, программное обеспечение и процедуры для тестирования ТДС на АЭС с использованием метода РСПТ. В рамках вышеупомянутых проектов разработка технологии РСПТ проводилась не только в ORNL и университете Теннесси, но и во Франции в сотрудничестве с EdF и КАЭ Франции. В частности, совместная с EdF работа выполнялась в лаборатории Les Renardieres недалеко от Парижа, а с КАЭ – в лаборатории в Сакле, также рядом с Парижем.

В лаборатории Les Renardieres имелась испытательная петля для моделирования рабочего режима реактора типа PWR. В этой петле EdF установила опытную секцию, чтобы можно было испытывать ТДС при температурах до 300°C, давлениях до 150 бар и скоростях среды до 10 м/с. Петля использовалась с целью проверки применимости метода РСПТ для измерения времени реакции ТДС в условиях рабочего режима PWR. В рамках этого проекта почти все испытания метода РСПТ проходили в лабораторных условиях, за исключением ограниченного числа тестов на исследовательском реакторе High Flux Isotope Reactor (HFIR) в лаборатории ORNL. Исследования на петле EdF в лаборатории Les Renardieres позволили получить данные, продемонстрировавшие пригодность метода РСПТ и определившие его точность для измерений времени реакции ТДС в рабочих условиях на АЭС с реакторами типа PWR.

С целью расширить круг работ, выполнявшихся в лаборатории Les Renardieres, дополнительные испытания применимости метода РСПТ были проведены в лаборатории в Сакле, где была создана технологическая петля для испытания датчиков. В качестве способа измерения времени реакции ТДС и термопар также испытывался метод анализа шумов. Было установлено, что этот метод позволял получать приемлемые результаты, хотя и не всегда такой высокой точности, как при помощи РСПТ. Ранее некоторые исследования по применимости метода анализа шумов проводились также на петле EdF в лаборатории Les Renardieres, и был сделан тот же вывод: этот метод в принципе позволяет измерять время реакции ТДС и термопар в рабочих условиях, без их демонтажа.

Первая демонстрация метода РСПТ в промышленных условиях была проведена на АЭС Миллстоун (Millstone), где измерялось время реакции для 16 ТДС. Результаты этих измерений и более ранних исследований метода РСПТ нашли свое отражение в тематическом

отчете, касающемся этой АЭС [2]. Отчет был подготовлен фирмой AMS по контракту с компанией Northwest Utilities, являвшейся оператором АЭС Миллстоун. Эта компания направила отчет в NRC с просьбой одобрить метод РСПТ для измерений времени реакции ТДС, установленных на АЭС. Обсуждения, заседания и встречи в формате вопросов и ответов с сотрудниками NRC продолжались около двух лет, прежде чем в 1980 году NRC одобрило РСПТ в качестве метода, удовлетворяющего требованиям Регламентирующего руководства 1.118, а также требованиям технических условий АЭС, относящихся к проверке времени реакции ТДС.

Вышеизложенное является лишь одним примером НИОКР, выполнявшихся совместно лабораторией ORNL, Университетом Теннесси, EPRI, компанией EdF, КАЭ Франции и компанией-оператором АЭС в поддержку атомной энергетики. Некоторые из этих организаций сотрудничали с фирмой AMS и другими фирмами в разработке методов тестирования и диагностики для других применений на АЭС; к числу таких применений относятся: измерения времени реакции без демонтажа датчиков давления, уровня и расхода; обнаружение в режиме on-line закупорок, пустот, утечек и стоячих волн в измерительных линиях давления; измерение вибрации корпусов реактора и внутриреакторных устройств; измерение запаса устойчивости реакторов типа BWR; мониторинг с целью обнаружения незакрепленных элементов конструкции и обнаружение в режиме on-line нарушений потока теплоносителя в активной зоне, закупорок на пути потока теплоносителя и его направления. Помимо исследований в США и Франции, начиная с 1975 года разработки в этих областях проводились в Германии, Венгрии, Японии, Голландии, России, Южной Корее и в других странах. Специалисты мировой атомной промышленности посвятили этим разработкам многочисленные публикации, которые были использованы автором при подготовке этой книги в максимальной степени.

2.2. Правительственные программы НИОКР

Разработки в области атомной энергии, которые финансируются правительствами стран и международными межправительственными организациями, обычно проводятся основными национальными и международными лабораториями и субподрядными организациями. В качестве примеров можно назвать лаборатории ORNL в США и КАЭ во Франции. В международном плане, проект, выполняющийся на реакторе в Халдене (Halden) в Норвегии, является примером программы, получающей

международное финансирование для выполнения НИОКР в поддержку атомной энергии и связанных с ней технологий.

В начале 1980-х годов в США была учреждена правительственная программа НИОКР для стимулирования деятельности отдельных специалистов и небольших фирм в области инновационных технологий. Небольшие фирмы определялись как фирмы с числом сотрудников не более 500 и с годовым доходом менее чем 25 млн. долларов по состоянию на 2006 г. Эта программа поддержки малого бизнеса в области проведения инновационных исследований (Small Business Innovation Research, или программа SBIR), обеспечивает финансирование в размере до 1 млн долларов на период в три года НИОКР для получения коммерчески применимых результатов исследований по определенным техническим направлениям. Эти направления определяются правительственными органами таким образом, чтобы они отвечали потребностям в приоритетных НИОКР, способствовали проведению инновационных работ в частном секторе и были направлены на доведение до коммерчески применимых результатов тех работ, которые финансируются правительством.

В рамках программы SBIR фирма AMS провела НИОКР для Департамента энергетики США (DOE), Министерства обороны США (DOD), Военно-воздушных сил США, NASA и NRC. Результаты этих проектов нашли свое отражение в нескольких официальных отчетах, таких как отчеты серии NUREG/CR, опубликованных NRC, а также отчетах, опубликованных NASA и Военно-воздушными силами США. Представительный перечень этих отчетов включает следующие документы:

- Отчеты NRC по характеристикам и влиянию старения ТДС, использующихся на АЭС: NUREG/CR-4928 и NUREG/CR-5560.
- Отчеты NRC по характеристикам и влиянию старения датчиков давления, использующихся на АЭС: NUREG/CR-5383 и NUREG/CR-5851.
- Отчеты NRC о разработке или оценке передовых технологий обслуживания контрольно-измерительных приборов (КИП) для АЭС: NUREG/CR-6343 и NUREG/CR-5501.
- Отчеты NRC о разработке или оценке новых датчиков для атомных установок: NUREG/CR-6312 и NUREG/CR-6334.
- Отчеты Военно-воздушных сил США по измерениям температуры переходных процессов на установках по испытанию реактивных двигателей: AEDC-86-46 и AEDC-TR-91-26.

- Отчеты NASA о разработке методов для оценки надежности контакта датчиков с твердым материалом без их демонтажа: Отчет NASA о первой фазе работы (не опубликован) и отчет NASA/CR-4744.

Материалы этих отчетов и некоторых других НИОКР – таких как метод анализа шумов для диагностики на АЭС, разработанный по контракту DOE с финансированием по программе SBIR – послужили основой для некоторых глав настоящей книги. Большинство использованных отчетов общедоступны и приведены в Приложении А.

2.3. Программы НИОКР, проводимые компаниями-операторами электростанций

Основные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, финансируемые компаниями-операторами электростанций в США, выполняются под руководством Института исследований по электроэнергетике (EPRI), штаб-квартира которого расположена в г. Пало Альто, штат Калифорния. Институт имеет ряд филиалов, например NMAC, который находится в г. Шарлотт, штат Северная Каролина. Главная задача EPRI – оказывать поддержку атомной энергетике: институт оказывает финансовую поддержку НИОКР, разрабатывает руководства, публикует научно-технические отчеты, организует совещания специалистов, семинары и учебные курсы. Он также представляет интересы своих организаций-членов в контактах по техническим вопросам с правительственными агентствами и другими организациями. Членами EPRI являются многие компании-операторы электростанций в США, а также некоторые компании, эксплуатирующие электростанции в других странах. Члены EPRI предоставляют институту финансирование и технические консультации, получая в ответ возможность использовать результаты его работы и технические ресурсы, некоторые из которых доступны за плату организациям, в нем не состоящим.

Недавним примером деятельности EPRI, относящейся к контрольно-измерительной технике, используемой на АЭС, явилось обобщение материалов и разработка методов мониторинга в режиме on-line, применимых для проверки калибровки измерительных устройств. Институт не только внес вклад в разработку этих методов и составление отчетных данных, но также помог добиться от NRC разрешения использовать эти методы на АЭС. В частности, в конце 1990-х годов EPRI выпустил тематический отчет на тему мониторинга калибровки датчиков давления

в режиме on-line. Этот отчет был передан NRC от имени компаний, представляющих атомную промышленность, с целью получить от NRC одобрение применения мониторинга в режиме on-line для увеличения интервала времени между калибровками датчиков давления, уровня и расхода, установленных на АЭС. После нескольких лет обсуждений и споров NRC одобрила подход с использованием мониторинга в режиме on-line, опубликовав в июле 2000 года доклад по оценке безопасности (Safety Evaluation Report, сокращенно SER), посвященный этой теме. Этот доклад сделал возможным внедрение в атомной промышленности методов калибровки датчиков давления, уровня и расхода, основываясь на их реальных рабочих характеристиках [3]. К настоящему времени АЭС «Сайзвелл» в Великобритании успешно использует on-line мониторинг для проверки калибровки датчиков давления, уровня и расхода в первичном и вторичном контурах охлаждения, а АЭС «V.C. Summer» в США подала в NRC заявку на изменение требований технических условий для того, чтобы перейти от калибровок приборов технологического контроля, выполняемых на основе принципа периодичности, к калибровкам, основанным на мониторинге их технического состояния.

Примером работы принадлежащего EPRI центра NMAC является разработка документа-руководства, обеспечивающего понимание персоналом АЭС правил эксплуатации и технического обслуживания системы управления стержнями СУЗ на АЭС с реакторами PWR. В дополнение к учебным материалам, объясняющим принципы работы систем управления стержнями, это руководство также содержит описание автоматизированных методов для измерения времени сброса управляющих и аварийных стержней СУЗ и тестирования времени и последовательности срабатывания механизмов привода стержней СУЗ и связанных с ними позиционных датчиков на АЭС с реакторами типа PWR [4].

Потребности электрогенерирующих компаний в новых разработках удовлетворяются не только деятельностью EPRI, но и работами, проводимыми национальными и международными лабораториями, а также собственными исследовательскими организациями этих компаний и организациями-поставщиками оборудования для АЭС. Например, у компаний Duke Power Company и Tennessee Valley Authority (TVA) имеются свои собственные возможности для разработки нового оборудования и новых методов технической поддержки их АЭС или по проведению при необходимости НИОКР; в таких случаях компании-операторы могут профинансировать свои собственные НИОКР или заключить контракт со специалистом или компанией, поставляющей оборудование.

Например, АЭС «Arkansas Nuclear One» (ANO) с двумя реакторами типа PWR, заключила контракт с фирмой AMS для обеспечения технической поддержки на реакторе второго блока (ANO-2). В конце 1970-х годов выяснилось, что некоторые ТДС, установленные в первичном контуре охлаждения ANO-2, не могли надежно удовлетворять техническим требованиям: время их реакции превышало 6 секунд. В то время не было других ТДС для использования на АЭС, которые могли бы с запасом удовлетворить такому требованию; по этой причине для обеспечения термического контакта пришлось прибегнуть к использованию компаунда «NEVER-SEEZ», который помещался в концевую часть термочannels ТДС с целью улучшить теплопередачу и уменьшить время реакции датчика. Среднее время реакции ТДС на блоке ANO-2 было снижено примерно с 6 до 4 с, что позволило продолжить эксплуатацию станции до тех пор, пока удалось найти другой тип ТДС и термочannels с тем, чтобы удовлетворить требованиям АЭС в отношении быстродействия датчика.

Компаунд «NEVER-SEEZ» обычно используют для смазки резьбовых соединений при сборке металлических деталей, он обладает хорошими смазывающими и теплопередающими свойствами и уверенно выдерживает рабочие температуры до примерно 200°C. На реакторе ANO-2, как и на большинстве реакторов типа PWR, температура в первичном контуре составляет 300°C или выше, поэтому компаунд «NEVER-SEEZ» нельзя было использовать для долгосрочного решения проблемы из-за ухудшения его теплопередающих характеристик при температуре, характерной для АЭС. Фирме AMS было поручено найти альтернативу использованию компаунда «NEVER-SEEZ». Проведенные исследования позволили предложить другие марки компаунда, и они были испытаны в лаборатории AMS. При долгосрочных испытаниях ни для одного из них не были получены результаты лучше, чем для «NEVER-SEEZ». Тогда AMS начала новые исследования, рассмотрев покрытие чувствительной части ТДС золотом или серебром с целью улучшить время реакции датчика. Этот метод показал хорошие результаты, и с тех пор такой подход применяется для улучшения времени реакции для нескольких моделей ТДС для АЭС. Тем временем, изготовители ТДС разработали новые датчики и термочannels, обеспечивающие лучшее быстродействие, что позволило предприятиям атомной промышленности выполнить требования, относящиеся к быстродействию этих датчиков.

2.4. Руководящие документы МАГАТЭ

МАГАТЭ выпускает технические отчеты (IAEA Technical Documents – IAEA-TECDOCs)¹ и руководящие документы для распространения информации (как уже известной, так и новой) на различные темы, представляющие интерес для атомной промышленности. К разработке документов МАГАТЭ привлекает международных экспертов, которые периодически встречаются на рабочих совещаниях в штаб-квартире МАГАТЭ в Вене (Австрия) или в других местах. Приглашенные эксперты в составе небольшой рабочей группы согласовывают содержание документа и на основе консенсуса подготавливают его текст, что занимает период времени от одного до двух лет. После этого документ выносится на обсуждение более широкого круга специалистов для внесения уточнений, дополнений и последующего одобрения. Опубликованные документы предоставляются странам-участницам за небольшую плату или бесплатно, после чего организуются заседания, конференции и практические семинары для объяснения материала, содержащегося в документах, и для ознакомления специалистов атомной промышленности с информацией МАГАТЭ.

Примерами документов МАГАТЭ по тематике, рассматриваемой в данной книге, являются следующие:

- IAEA-TECDOC-1147, «Управление процессом старения оборудования КИП и СУЗ на АЭС», июнь 2000 г.
- IAEA-TECDOC-1327, «Согласование процесса лицензирования цифровых систем КИП и СУЗ на АЭС», декабрь 2002 г.
- IAEA-TECDOC-1402, «Управление сроком службы и процессом старения оборудования на АЭС: Улучшенное техническое обслуживание систем КИП и СУЗ», август 2004 г.
- IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.1, «Улучшение эксплуатационных показателей АЭС с помощью on-line мониторинга, часть 1: Мониторинг рабочих характеристик инструментальных каналов», октябрь 2008 г.
- IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.2, «Улучшение эксплуатационных показателей АЭС с помощью on-line мониторинга,

¹ С 2007 г. МАГАТЭ публикует технические отчеты по контрольно-измерительной технике в рамках новой серии документов по ядерной энергии (IAEA Nuclear Energy Series). Документы МАГАТЭ можно бесплатно скачать с сайта МАГАТЭ www.iaea.org — *Примеч. ред.*

часть 2: Мониторинг и диагностика технологического процесса и состояния элементов оборудования», октябрь 2008 г.

Автор этой книги участвовал в работе групп экспертов, которые подготовили эти и другие международные документы, руководства и отчеты; и полученный опыт нашел свое отражение в книге.

2.5. Стандарты ISA и МЭК

Разработка стандартов на основе консенсуса выполняется Обществом специалистов по измерительным устройствам и автоматическим системам (ISA), Международной электротехнической комиссией (МЭК) и другими организациями, например, Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM) с целью выработки требований для атомной и других отраслей промышленности в области эксплуатации и технического обслуживания технологических процессов, а также разработки оборудования и программного обеспечения. Иногда эти стандарты утверждаются национальными организациями по стандартизации, такими как Американский национальный институт стандартов (American National Standards Institute — ANSI). Некоторые примеры таких стандартов приведены ниже:

- Стандарт ANSI/ISA 67.06.01-2002, «Мониторинг рабочих характеристик измерительных каналов АЭС, важных для ядерной безопасности», 2002 г.
- Стандарт ANSI/ISA 67.04.01-2000, «Уставки для измерительных систем, важных для ядерной безопасности», 2000 г.
- Стандарт МЭК 62342, «Атомные электростанции — Системы КИП, важные для обеспечения безопасности — Управление процессом старения», 2007 г.
- Стандарт МЭК 62385, «Атомные электростанции — Методы оценки рабочих характеристик измерительных каналов систем безопасности», 2007 г.
- Стандарт IEEE 323, «Стандарт IEEE для квалификации оборудования Класа 1Е для атомных электростанций», 2004 г.
- Стандарт IEEE 338, «Стандартные критерии IEEE для периодического надзорного тестирования систем безопасности атомных электростанций», 1988 г.
- Стандарт ASTM E644, «Стандартные методы тестирования для проверки промышленных термометров сопротивления», 2004 г.

- Стандарт ASTM E230, «Спецификация и таблицы значений электродвижущей силы (ЭДС) для типовых термопар», 2003 г.

Автор участвовал в разработке некоторых из этих стандартов, возглавлял рабочие группы по подготовке их частей или принял другое участие в их создании, и его работа, связанная с этой деятельностью, помогла написать данную книгу. Краткое описание некоторых стандартов, имеющих особое значение для рассматривающихся в книге проблем, представлено ниже:

- Стандарт ANSI/ISA 67.06.01. Этот стандарт был разработан в начале 1980-х годов для описания методов измерения времени реакции датчиков температуры и давления на АЭС. Он был переработан в конце 1990-х годов с целью включения методов мониторинга в режиме on-line для проверки калибровки датчиков технологического процесса во время работы электростанций. Первоначальный стандарт 67.06, который ISA опубликовал в 1984 г., назывался «Тестирование времени реакции измерительных каналов АЭС, важных для ядерной безопасности». В новой редакции документ был опубликован в 2002 г. и называется «Мониторинг рабочих характеристик измерительных каналов АЭС, важных для ядерной безопасности».
- Стандарт ASTM E644-04. Стандарт рассматривает промышленные ТДС — от их производства и технических спецификаций до требований к их испытаниям. Например, в стандарте описываются методы, которые изготовители датчиков и другие организации должны использовать для измерения времени реакции ТДС в стандартных лабораторных условиях. Окончательная редакция этого стандарта датирована 2004 годом и называется «Стандартные методы тестирования для проверки промышленных термометров сопротивления».
- Стандарт МЭК 62385 (опубликован в 2007г.). Стандарт устанавливает требования к тестированию характеристик датчиков на АЭС и включает методы РСПТ и анализа шумов для измерения времени реакции датчиков. Этот стандарт заменил стандарт МЭК 61224, выпущенный в 1993 г., чтобы сформулировать требования для измерения времени реакции ТДС с использованием методов РСПТ и анализа шумов.
- Стандарт МЭК 62342 (опубликован в 2007г.). Стандарт устанавливает общие рекомендации для АЭС, обеспечивающие ее безопасность при нормальном процессе старения приборов. Этот стандарт был разработан на основе рекомендаций, содержащихся

в документе IAEA-TECDOC-1147, «Управление процессом старения оборудования КИП и СУЗ на АЭС».

Хотя специалисты, организации и комитеты, занимающиеся подготовкой стандартов, много работают над созданием современных и точных национальных и международных стандартов, нельзя дать гарантию того, что какой-либо стандарт учитывает все необходимые факторы или устанавливает все соответствующие требования. В некоторых случаях, тот факт, что требования стандарта выполняются, может оказаться недостаточным для обеспечения надлежащей эксплуатации и безопасности станции, независимо от того, насколько современным является этот стандарт.

Стандарты обычно готовит небольшая группа добровольцев, обладающих глубокими знаниями по соответствующей тематике и интересующихся ей, а также имеющих достаточное финансирование, чтобы участвовать в подготовке стандарта. Зачастую в работе по разработке стандартов принимают участие организации-поставщики содействуя установлению требований к промышленным предприятиям. Иногда, внося свой вклад в подготовку стандарта, поставщики также содействуют продвижению своих изделий и идей. Принято, что ни отдельные поставщики или специалисты, ни объединения поставщиков или группы со своими специальными интересами не должны влиять на стандарт или играть в его подготовке доминирующую роль. Обычно по всем вопросам, затрагиваемым в стандарте, удается достичь консенсуса, однако всегда имеется потенциальная возможность возникновения конфликта интересов. В этом смысле, пользователям стандарта или документа не следует полагаться на этот стандарт или даже на группу стандартов в качестве единственного источника требований или руководств по обеспечению надлежащей эксплуатации и безопасности АЭС.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ КОНТРОЛЬНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ АЭС

Техническое обслуживание приборного парка АЭС обычно включает в себя следующие испытания [5]:

1. Проверка калибровки
2. Измерение времени реакции
3. Тестирование кабелей
4. Выполнение диагностики посредством анализа шумов

Проведение этих испытаний обусловлено целым рядом причин: например, почти на всех АЭС обязательным требованием является проверка калибровки основных контрольно-измерительных приборов (КИП). На других станциях, чтобы обеспечить выполнение требований технического регламента станции и (или) нормативных документов, в дополнение к проверке калибровки должны производиться измерения времени реакции приборов технологического контроля. Тестирование кабелей и шумовая диагностика, как правило, не являются обязательными, но их обычно выполняют для поиска неисправностей и выявления коренной причины аномальных показаний и других проблем в КИП.

и СУЗ. В промышленных стандартах и руководствах часто рекомендуется изучение динамики изменения калибровки и результатов измерения времени реакции, а также тестирование кабелей и шумовая диагностика в качестве превентивного технического обслуживания и управления процессом старения оборудования КИП и СУЗ.

Хотя книга и содержит много рекомендаций по устранению неисправностей в измерительных устройствах, термин *техническое обслуживание* используется автором прежде всего в значении проверки рабочих характеристик оборудования, а не в значении проведения ремонта. Техобслуживание может включать в себя активные и пассивные виды работ. Примерами активных действий являются измерение, мониторинг, калибровка или анализ, а пассивных — визуальный осмотр, прослушивание, прощупывание и регистрация запаха. Например, динамические характеристики датчика проверяются при помощи измерения времени его реакции (активный вид обслуживания), а состояние изоляции его кабеля можно оценить, изучая визуально цвет кабеля, его текстуру и целостность (пассивный вид обслуживания).

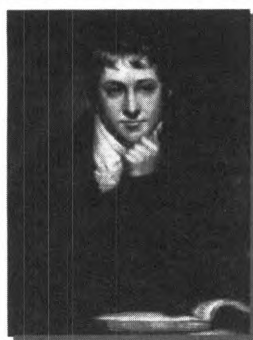
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АЭС

Большинство измерений критически важных температур технологических процессов на АЭС выполняют при помощи ТДС и термопар. Например, на АЭС с реактором типа PWR температуру теплоносителя в трубопроводах первого контура и температуру питательной воды измеряют, используя ТДС, а температуру воды на выходе из активной зоны реактора измеряют при помощи термопар. Эти термопары, называемые *термопарами на выходе из зоны*, используют главным образом для целей мониторинга температуры, и поэтому к ним обычно не применяют очень жесткие требования в отношении точности и времени реакции. Напротив, ТДС, измеряющие температуру теплоносителя в трубопроводах первого контура, обычно задействованы в системах управления и обеспечения безопасности станции и, следовательно, должны иметь высокую точность и хорошие динамические характеристики. Из-за важности ТДС на АЭС и жестких требований к проверке их рабочих характеристик проблемы измерения температуры в дальнейшем рассматриваются главным образом с точки зрения проверки надлежащей работы ТДС.

4.1. История создания ТДС

ТДС используют начиная с девятнадцатого столетия. Первоначально их чувствительные элементы изготавливали из платины, меди, никеля и других металлов или сплавов с электрическим сопротивлением, пропорциональным температуре. В настоящее время чувствительный элемент промышленных ТДС почти всегда изготавливают из платиновой проволоки. Первое время ТДС отличались хрупкостью и нестабильностью в работе, потому что в платиновый чувствительный элемент проникали загрязняющие примеси. Ныне промышленные ТДС отличаются высокой прочностью и надежностью, и их можно применять для измерения в таких крайне тяжелых условиях, как (1) в тормозных устройствах высокоскоростных самолетов, для температур, превышающих 1000 °С, (2) в теплоносителе первичного контура реакторов типа PWR, для температур, достигающих 350 °С, где скорости превышают 10 м/с, а давление составляет примерно 150 бар, и, наконец, (3) при океанографических исследованиях для измерения температур воды, где очень высоко гидравлическое давление, и важно обеспечить высокую точность и малое время реакции датчика (менее 0,5 с).

В 1821 г. сэр Хамфри Дэйви (Humphry Davy, Англия) обнаружил, что проводимость металлов меняется при изменении температуры. Первую попытку использовать это свойство металлов для измерения температуры предпринял в 1871 г. К.У. Сименс (C.W.Siemens, Германия). Он изготовил ТДС, используя платиновую проволоку, навитую на сердечник из глины, вставленный в стальной кожух. Первые ТДС, изготовленные Сименсом, страдали от сильного изменения в сопротивлении



Хамфри Дэйви
1778–1829
Англия



К.У. Сименс
1823–1883
Германия



Х.Л. Кэллендэр
1863–1930
Англия

ТДС при высоких температурах и не могли использоваться для точных измерений.

Примерно в 1891 г. Х.Л.Кэллендэр (H.L.Callendar, Англия) установил, что причиной неудовлетворительной работы ТДС Сименса являлось проникновение в платиновую проволоку загрязняющих примесей из глины и железа. Поэтому он разработал новую конструкцию ТДС, которая состояла из платиновой проволоки диаметром 0,15 мм, намотанной на полоску слюды длиной примерно 9 см, и тонких слюдяных продольно расположенных дисков, сводящих до минимума влияние конвекции. В ТДС были использованы подводящие провода из меди или серебра, а также свободная от внутренних напряжений платина высокой чистоты. Работа Кэллендэра проложила путь к разработке К.Л.Майерсом (C.L.Meyers) классических ТДС в 1932 г. Эти разработки привели к созданию нынешних ТДС, применяемых в промышленности; их конструкция стала достаточно прочной благодаря керамическому сердечнику, надежно защищающему чувствительный элемент, и изоляции из окиси магния (или эквивалентного ей материала).

4.2. ТДС ядерного класса

В мире существует около 100 фирм, поставляющих ТДС, но из них менее десяти производят ТДС для применений, связанных с обеспечением безопасности АЭС. Тому причина – относительно небольшой спрос на это оборудование и крайне жесткие требования к характеристикам и надежности этих ТДС. Например, ТДС, относящиеся к ядерной безопасности, должны выдерживать соответствующие стандартам IEEE испытания, относящиеся к работе в среде с неблагоприятными параметрами и в условиях высокой сейсмичности. В результате испытаний датчики должны сохранять свою работоспособность при аварии с потерей теплоносителя, выдерживать землетрясение и продолжать надежно работать в послеаварийных условиях.

То, что комплект ТДС ядерного класса может удовлетворить этим требованиям, было продемонстрировано в 1979 г. после аварии на втором блоке АЭС Три Майл Айленд (ТМІ-2) в США. В частности, ТДС первого контура теплоносителя, установленные на блоке ТМІ-2 (ТДС марки Rosemount, модель 177), были испытаны после аварии, и было обнаружено, что они сохранили свою калибровку, время реакции и целостность. Напротив, термопары на выходе из активной зоны на блоке ТМІ-2 большей частью отказали из-за радиационных повреждений. Некоторые из них показывали ошибочно высокие температуры, в то

время как другие давали неправдоподобно низкие показания температуры (в том числе, отрицательные), находясь почти в тех же самых местах. Исследование этих термопар показало, что такой разброс показаний был вызван неоднородностями, появившимися в проводах термопар после радиационного облучения высокого уровня.

ТДС, отвечающие требованиям обеспечения безопасности, используются большей частью в системах первого контура АЭС с реакторами PWR. В зависимости от конкретной АЭС, на станции может быть установлено от 16 до 32 ТДС. На некоторых АЭС, таких как АНО-2 в США и станция Sizewell B в Великобритании, в силу конкретных причин установлено еще больше ТДС. Например, на АНО-2 число ТДС выше из-за проблемы неоднородного распределения температуры в потоке теплоносителя на горячих участках трубопроводов. Неоднородность распределения температуры характерна для горячих участков трубопроводов станций с реакторами PWR, и от конкретной станции зависит, насколько эта проблема серьезна. По ряду причин на АНО-2 она более серьезна, чем на других АЭС, но это не представляет опасности для эксплуатации или безопасности станции. На АЭС АНО-2 эту проблему называют «аномалией горячего участка» и дополнительные ТДС нужны для учета влияния подобной «аномалии». Что касается АЭС Sizewell B, то 60 ТДС установлены в первом контуре охлаждения просто потому, что на этой станции используется цифровая система КИП с полной резервной аналоговой системой, и поэтому число датчиков вдвое выше, чем на большинстве АЭС с реакторами типа PWR.

Простой расчет, основанный на данных о числе ТДС в реакторе PWR и числе таких реакторов в мире, показывает, что на всех АЭС с реакторами PWR установлено менее 10 000 ТДС, относящихся к обеспечению ядерной безопасности, включая запасные датчики. Считая, что средний срок работы этих датчиков примерно 20 лет, суммарный спрос на эти датчики довольно небольшой (менее 1000 новых ТДС в год). Стоимость ТДС, относящихся к обеспечению безопасности АЭС, обычно очень высока в сравнении с обычными ТДС, и только небольшая группа фирм-производителей занимается их изготовлением. Действительно, большинство производителей ТДС, относящихся к обеспечению ядерной безопасности, являются небольшими компаниями (менее 500 сотрудников), потому что большие компании обычно не могут оправдать высокие накладные расходы, выполнение гарантийных обязательств и затраты, связанные с обеспечением качества оборудования АЭС. Что касается ТДС, не связанных с обеспечением безопасности, и других температурных датчиков для АЭС, таких как термопары

и теристоры, их поставляет много фирм-поставщиков с различными вариантами поставок. В таблице 4.1 перечислены некоторые компании, поставляющие ТДС ядерного класса.

Помимо крайне высокой надежности и способности сохранять свою работоспособность при аварии, требуется, чтобы ТДС, относящиеся к обеспечению ядерной безопасности, имели хорошую калибровку и малое время реакции, так как эти характеристики важны для обеспечения безопасности и хороших экономических показателей станции. На рис. 4.1 приводится упрощенная схема первого контура охлаждения АЭС с реактором PWR. Как известно, мощность реактора (P) равна произведению прироста температуры (ΔT) теплоносителя в активной зоне на его расход ($\dot{m}$) через первый контур ($P \approx \dot{m} \Delta T_k$). Типичный прирост температуры составляет примерно 30°C , значит ошибка в измерении ΔT , равная одному градусу, соответствует ошибке в мощности, равной $3,33\%$. Поэтому точная калибровка ТДС имеет большое значение для экономических показателей станции. По этой причине ТДС

Таблица 4.1. Перечень некоторых поставщиков ТДС ядерного класса

Изготовитель ТДС	Модель	Тип ТДС
Conax	7N10	С термоканалом
	7RB4	Прямого погружения
	7N13	С термоканалом
RdF	21204	Прямого погружения
	21297	Прямого погружения
	21232	С термоканалом
	21458	С термоканалом
	21459	С термоканалом
	21465	С термоканалом
Rosemount	104AFC	С термоканалом
	176KF	Прямого погружения
	177HW	С термоканалом
	177GY	Прямого погружения
Sensycon	1703	С термоканалом
	1717	С термоканалом
Weed	N9004	С термоканалом
	N9007	Прямого погружения
	N9019	Прямого погружения

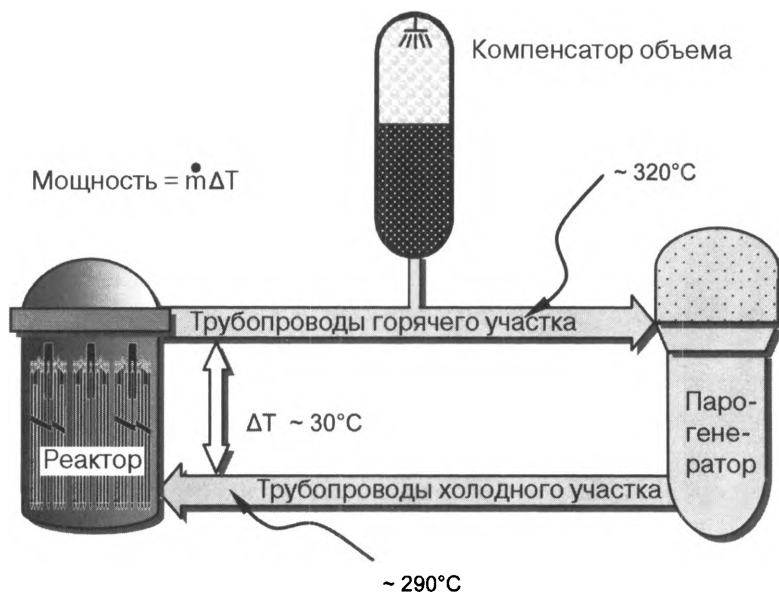


Рис. 4.1. Упрощенная схема петли первого контура охлаждения реактора PWR

первого контура реакторов PWR перед установкой обычно калибруют с точностью 0,3°C или выше. Более того, эту точность калибровки периодически проверяют в течение времени работы ТДС на АЭС при помощи метода перекрестной калибровки, описываемого в главе 5.

На рис. 4.2 представлена ситуация ступенчатого изменения температуры теплоносителя первого контура реактора PWR. В этом случае ожидается, что ТДС своевременно подаст соответствующий сигнал, что приведет к действиям, уменьшающим опасность, включая, если необходимо, аварийный останов реактора в целях обеспечения безопасности. По этой причине к времени реакции ТДС первого контура предъявляются жесткие требования. Эти требования для разных станций разнятся. Например, для АЭС, где ТДС первого контура установлены в термоканалы, время реакции должно быть в диапазоне от 4,0 до 8,0 с. Это значительно отличается от диапазона (1,0–3,0) с, характерного для ТДС прямого погружения, устанавливаемых в байпасных контурах. Как будет показано в главе 6, на некоторых станциях байпасные линии используются для облегчения отбора проб воды, охлаждающей реактор, из всех петель теплоносителя и смешивания их перед тем, как использовать для измерения температуры теплоносителя первого контура. Вследствие этого, ТДС байпасных петель должны обычно иметь малое время реакции, чтобы компенсировать задержку во времени, вызываемую

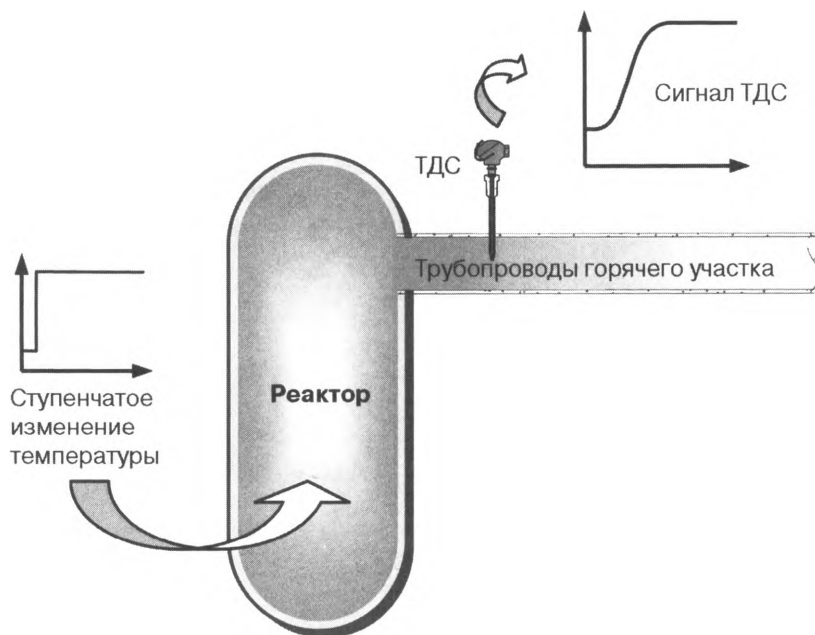


Рис. 4.2. Реакция ТДС на ступенчатое изменение температуры в реакторе

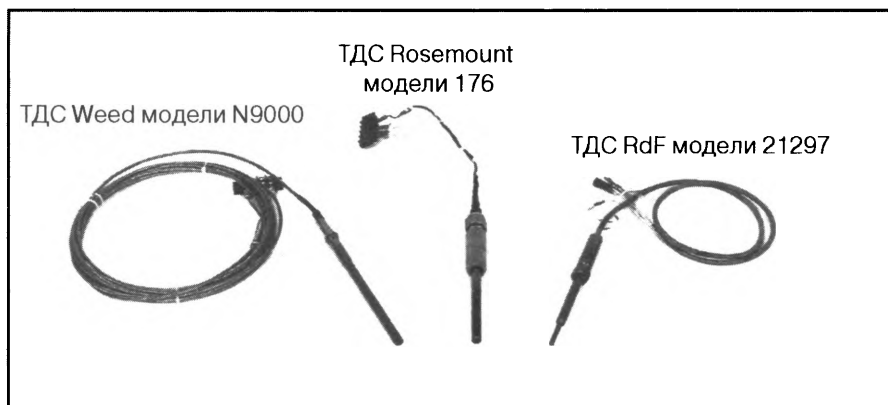


Рис. 4.3. ТДС ядерного класса — датчики прямого погружения

движением воды от трубопровода первого контура до того места, где измеряется ее температура.

На рис. 4.3 приведена фотография трех ТДС ядерного класса, являющихся датчиками прямого погружения: по одному датчику от фирм Rosemount, RdF Corporation и Weed Instrument Company. Самый быстрый ТДС, датчик фирмы Rosemount с временем реакции менее 0,3 с,

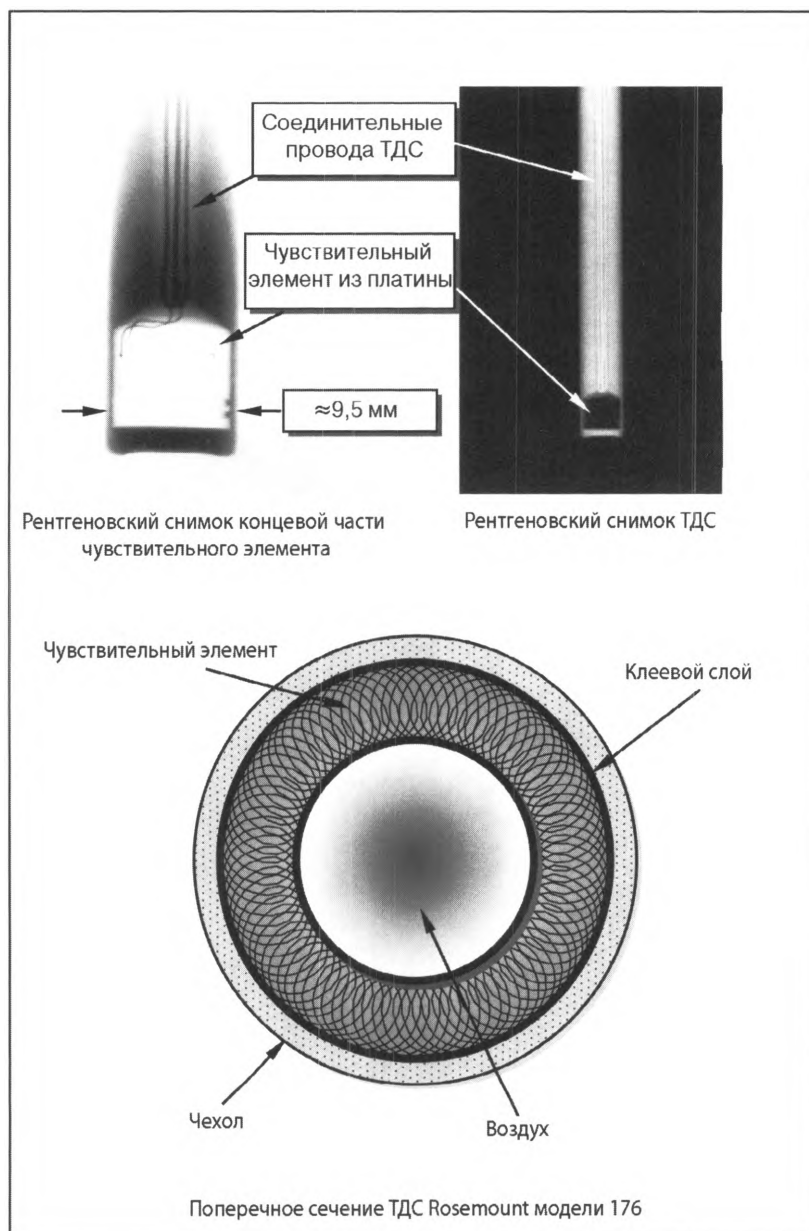


Рис. 4.4. Рентгеновские снимки и поперечное сечение ТДС Rosemount, модель 176

устроен так, что его чувствительный элемент прикреплен к чехлу, что хорошо видно на двух рентгеновских снимках и на поперечном сечении, рис. 4.4.

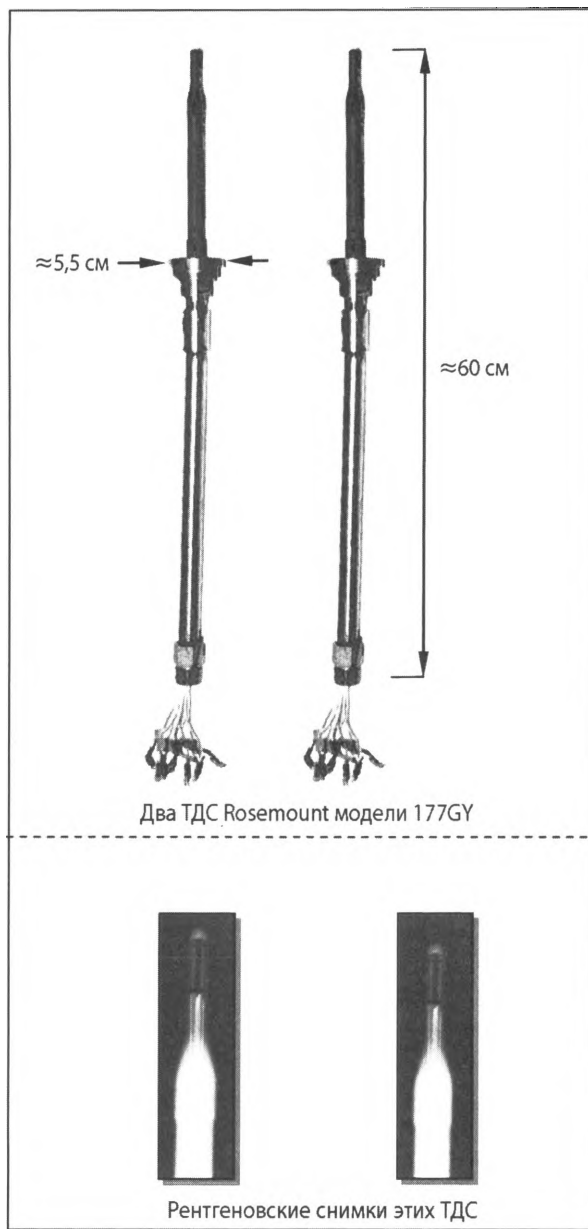


Рис. 4.5. Фотография и рентгеновские снимки ТДС прямого погружения фирмы Rosemount, модель 177GY

На некоторых АЭС с реакторами PWR ТДС прямого погружения используются в трубопроводах первого контура, а не в байпасных петлях. На рис. 4.5 приведены фотографии и рентгеновские снимки двух ТДС прямого погружения фирмы Rosemount, модель 177GY. Эти ТДС

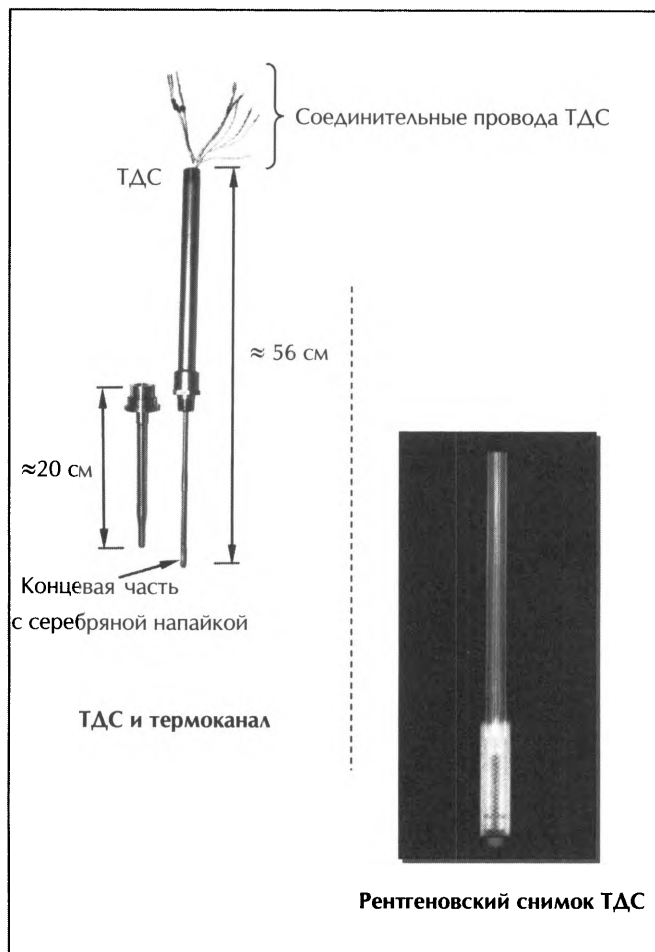


Рис. 4.6. Фотография и рентгеновские снимки ТДС Rosemount, модель 177HW

установлены непосредственно в трубопроводах первого контура АЭС с реакторами PWR конструкции Babcock and Wilcox (B&W). На рис. 4.6 показан датчик Rosemount, модель 177HW с установкой в термоканал, являющийся «двойником» вышеупомянутой модели 177GY. Этот ТДС также используется в основном на АЭС Babcock and Wilcox; для того чтобы уменьшить время реакции, на оконечности чувствительного элемента датчика сделана серебряная напайка. В других ТДС, как например в ТДС фирмы RdF, для этой цели также используется покрытие или напайка серебром. На рис. 4.7 приведена фотография ТДС фирмы RdF с серебряным покрытием.

На рис. 4.8 представлена измерительная сборка на основе ТДС с термоканалом фирмы Rosemount, модель 104. Это датчик с одним чувствительным



Рис. 4.7. ТДС фирмы RdF с серебряным покрытием

элементом и с холостой компенсационной петлей. Устройство ТДС показано на рис. 4.9; видно, что на самом ТДС и на его термоканале имеются сужения в области оконечности чувствительного элемента. Это сделано для того, чтобы обеспечить более плотную посадку ТДС в термоканал и уменьшить время реакции датчика. Имеются разные конструкции термоканалов, сужающихся на конце (рис. 4.10); такие термоканалы часто применяются на АЭС.

4.3. Термины, относящиеся к измерениям температуры на АЭС

Ниже приводятся примеры общепринятых терминов, связанных с устройствами для измерения температуры на АЭС.

Воспроизводимость. Способность получать одинаковый результат, используя тот же датчик в тех же условиях. Воспроизводимость равна максимальной разнице между результатами повторных измерений одним и тем же датчиком с использованием одних и тех же измерительных устройств и процедуры при заданных условиях. Также называется *прецизионностью*.

Время реакции. Время, требующееся для того, чтобы сигнал на выходе датчика после ступенчатого изменения температуры достиг 63,2% от своего конечного значения. Также называется *постоянной времени*. (Заметим, что термин *постоянная времени* имеет смысл лишь для динамической системы первого порядка. Хотя датчики температуры не обязательно являются системами первого порядка, термин *постоянная*

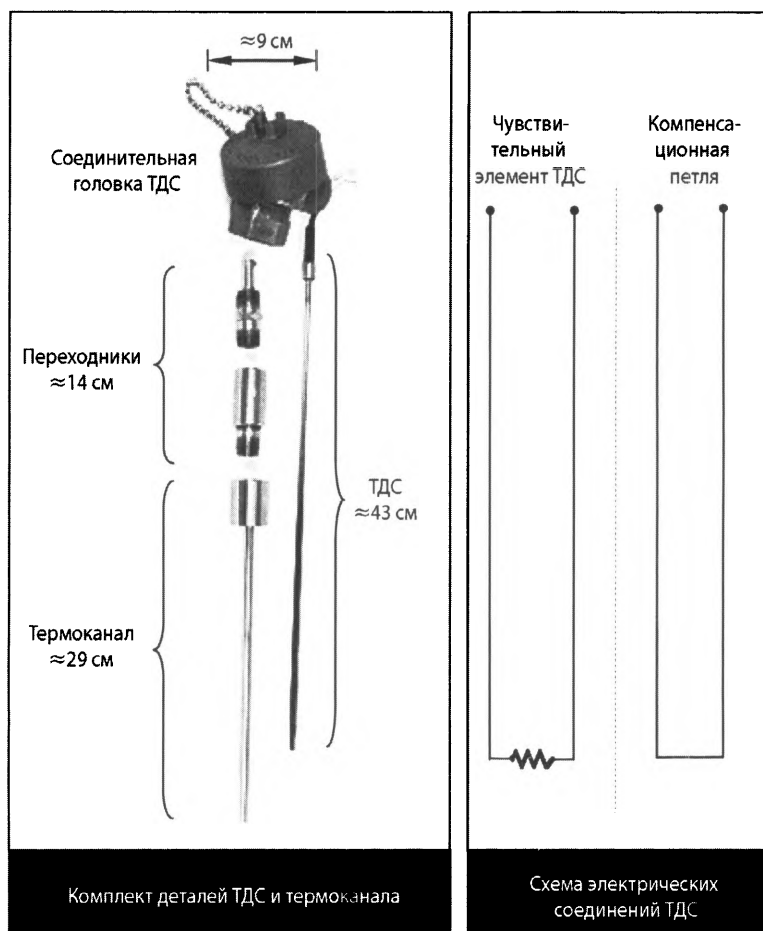


Рис. 4.8. Компоненты измерительной сборки на основе ТДС с термоканалом (Rosemount, модель 104) в разобранном виде

Примечание: Новые ТДС фирмы Weed, заменяющие этот ТДС, имеют примерно те же конфигурацию и размеры

времени часто используется, чтобы количественно охарактеризовать их динамическую реакцию.)

Датчики канального типа. Датчики, конструкция которых предполагает их установку в термоканал. Их также называют *датчиками с термоканалами*.

Датчики «мокрого типа». Датчики, которые устанавливаются непосредственно в рабочую среду в отличие от датчиков, устанавливаемых в термоканалы. Их также называют *датчиками непосредственного погружения*.

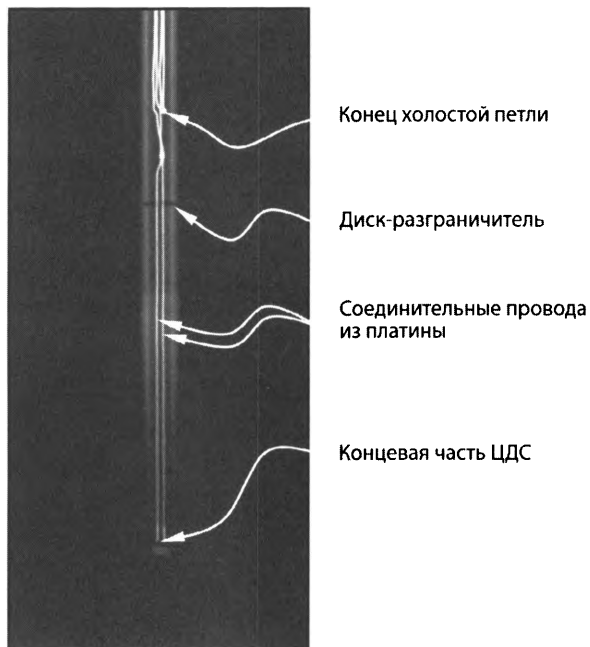


Рис. 4.9. Расположение проводов внутри ТДС Rosemount, модель 104, типичного для датчиков, используемых на АЭС с реакторами типа PWR (четырёхпроводный ТДС с холостой петлей для компенсации)



Рис. 4.10. Примеры термоканылов для ТДС, используемых на АЭС

Датчики прямого погружения. См. определение датчики «мокрого типа».

Деградация. Изменения в калибровке или времени реакции температурного датчика. Изменения времени реакции обычно называют *деградацией*, а изменения в калибровке — *дрейфом* или *смещением*.

Дрейф. Изменения в точности, происходящие с течением времени; также называются *дрейфом калибровки, смещением калибровки, стабильностью* или *нестабильностью*.

Испытания в режиме on-line. Испытания датчиков дистанционно, на месте их установки во время работы станции. См. также *испытания без демонтажа*.

Испытания без демонтажа. Испытания без демонтажа означают, что приборы остаются установленными на своих местах на технологической установке в противоположность их удалению из технологического оборудования с целью их испытания. См. определение термина *испытания в режиме on-line*.

Калибровка. Связь между сигналом на выходе датчика и температурой. Таблица, в которой приводится перечень значений сопротивления ТДС в виде функции от температуры называется *калибровочной таблицей*, а график зависимости сопротивления от температуры называется *калибровочной кривой*. Чтобы обеспечить уровни точности, требующиеся в атомной промышленности, необходимо отдельно калибровать каждый ТДС. Поэтому ТДС, используемые на АЭС, калибруются индивидуально в лабораторных условиях перед установкой на станции. Термопары обычно индивидуально не калибруют, а калибруется представительная выборка термопар, изготовленных по одинаковым техническим условиям, полученные результаты используются и для остальных термопар, входящих в ту же партию.

Кривая зависимости R от T. Зависимость сопротивления ТДС от температуры, выражаемая в виде графика, таблицы или диаграммы.

Неопределенность. Потенциально возможная разница между истинной температурой процесса и сигналом на выходе приборов, измеряющих температуру. (См. также определение *точности*.)

Обычное старение. Естественная деградация рабочих характеристик датчика по мере того, как он подвергается воздействию обычной для него внешней среды и типичных условий эксплуатации.

Ошибка. Применяется в том же значении, что и неопределенность, неточность или точность.

Перекрестная калибровка. Сравнение среднего показания взаимодублируемых ТДС с каждым индивидуальным показанием с целью проверить их согласованность и выявить выбросы. Метод перекрестной калибровки применим для проверки в режиме on-line того, что калибровка взаимодублируемых ТДС не претерпела значительных изменений. Он основан на предположении, что взаимодублируемые ТДС не имеют совместного дрейфа (дрейфа в одном направлении).

На некоторых станциях перекрестная калибровка используется также для термопар. Обычно перекрестная калибровка термопар выполняется, используя сравнение со средним показанием взаимодублируемых ТДС как наиболее точных датчиков температуры.

Постоянная времени. См. определение *времени реакции*.

Прецизионность. См. определение *воспроизводимости*.

Рабочие характеристики. Общий термин, используемый для описания статических (калибровка и точность) и динамических (время реакции) характеристик датчика.

СПТС. Стандартный платиновый термометр сопротивления, называемый также *стандартным ТДС* или *ПТС* (платиновым термометром сопротивления). СПТС обычно калибруют в NIST и используют в качестве промежуточного эталона для калибровки промышленных датчиков температуры в лабораторных условиях.

Самонагрев. Это явление, в котором электрический ток, используемый для измерения сопротивления ТДС, нагревает датчик изнутри.

Систематическая ошибка. Постоянная ошибка или смещение.

Случайная ошибка. Ошибки, которые по величине могут быть положительными или отрицательными по отношению к истинному значению температуры. Случайные ошибки иногда называют *несистематическими*.

Смещение. Изменения в зависимости сопротивления ТДС от температуры, также называемые *дрейфом*. Смещение предполагает внезапное изменение, происходящее в конце какого-либо периода времени или испытания, в то время как под дрейфом подразумевают постепенные изменения.

Совместный дрейф. Направленный в одну сторону дрейф калибровки группы взаимодублируемых датчиков. Если все датчики группы дрейфуют в положительном или отрицательном направлении, говорят, что у них имеется «совместный дрейф».

Сопротивление изоляции. Электрическое сопротивление между любым соединительным проводом на выходе из датчика и заземленным проводом.

Старение. Термин *старение* в том смысле, в каком он используется в данной книге, означает нарушение калибровки или ухудшение времени реакции датчика с течением времени при работе в нормальной технологической среде и при штатных условиях эксплуатации. Это определение основано на следующем определении старения, принятым Комиссией ядерного регулирования США в своей Программе исследований старения АЭС (программа Nuclear Plant Aging Research или NPAR): «накапливающаяся деградация, происходящая с течением времени в компоненте, системе или конструкционном элементе, которая, если ее не сдерживать, может привести к потере работоспособности и снижению безопасности».

Так как характеристики температурных датчиков на АЭС регулярно проверяются, ухудшение их работоспособности не накапливается, и поэтому слово «накапливающаяся» не включено в определение старения ТДС, данное выше.

Стабильность. Способность температурного датчика сохранять свою точность. Количественной характеристикой стабильности является дрейф или скорость дрейфа ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Термин *стабильность* (или противоположный ему термин *нестабильность*) также применяется для описания величины флуктуаций температуры технологического процесса. Относительно спокойный процесс называют *стабильным*, а процесс с большими флуктуациями – *нестабильным* (или с высоким уровнем шумов).

ТДС. Температурный датчик сопротивления, используемый для промышленных целей. Если чувствительный элемент ТДС сделан из платиновой проволоки, то ТДС называют также *платиновым термометром сопротивления (ПТС)* или *платиновым ТДС*.

ТДС коммерческого класса. ТДС для общих целей, изготовленный для обычных промышленных применений в отличие от применений, связанных с ядерной безопасностью.

ТДС ядерного класса. Платиновый ТДС, сконструированный для применения в системах обеспечения безопасности АЭС. Представительный комплект ТДС ядерного класса любого типа должен пройти аттестационные испытания на соответствие стандартам IEEE. Глубина аттестационных испытаний зависит от местоположения ТДС на АЭС.

Термоканал. Защитная трубка (чехол), используемая для защиты датчика от рабочей среды и для того, чтобы его можно было легко заменить.

Точность. Максимальное положительное или отрицательное отклонение, которое может наблюдаться между истинным значением температуры технологического процесса и температурой, которую показывает датчик. Этот термин включает ошибки калибровки, а также такие присущие ТДС ошибки, как вызываемые гистерезисом, ограниченной воспроизводимостью результатов измерений и самонагревом. Более правильным термином, чем *точность*, является *неопределенность*, но это выражение применяется редко из-за возможности его отрицательного толкования.

Чувствительный элемент. Проволока (обычно платиновая), размещенная внутри ТДС, сопротивление которой изменяется в зависимости от температуры. Что касается термопар, их чувствительным элементом является измерительный спай, где две проволоки термопары соединяются на оконечности датчика.

ЭДС. Электродвижущая сила, относится к напряжению на выходе термопары. В ТДС наличие ЭДС является нежелательным явлением, которое может возникать из-за плохой конструкции датчика или использования в нем разнородных металлов.

LER (Licencee Event Report). Отчет компании-оператора, обладающей лицензией на эксплуатацию станции, о происшествиях на АЭС. База данных LER содержит сведения об отказах определенного оборудования АЭС, о которых следует предоставлять эти отчеты.

NIST (National Institute of Standards and Technology). Национальный институт стандартов и технологии США, ранее назывался Националь-

ным бюро стандартов (National Bureau of Standards). Калибровка температурных датчиков и измерительных устройств, применяемых для испытаний и измерений технологических процессов, связанных с обеспечением безопасности АЭС, должны проводиться в привязке к NIST, используя промежуточные эталоны, такие как стандартный платиновый термометр сопротивления (СПТС), а также эталоны сопротивления и напряжения. Привязка к NIST обычно обеспечивается тем, что эталон, используемый для калибровки, сам был откалиброван в NIST.

NPAR (Nuclear Plant Aging Research). Программа исследований старения АЭС, начатая Комиссией ядерного регулирования США в начале 1980 годов для того, чтобы изучить природу процессов старения компонентов, систем и конструкций АЭС.

NPRDS (База данных по надежности оборудования АЭС). База данных с отчетами о выходе из строя оборудования АЭС, которые компании-операторы АЭС добровольно направляют в Институт эксплуатации АЭС (Institute of Nuclear Power Operations), США.

4.4. Неисправности ТДС ядерного класса

Работа ТДС ядерного класса, как и ТДС этого типа, относящихся к коммерческому классу, может сопровождаться дрейфом калибровки, снижением сопротивления изоляции, появлением неустойчивых сигналов на выходе, неисправностями в соединительных проводах и тому подобными нарушениями в работе. Вышеперечисленные неисправности у ТДС ядерного класса встречаются существенно реже, чем у ТДС коммерческого класса, из-за гораздо более высокого качества первых: испытания почти 100 ТДС ядерного класса, проведенные в конце 1980-х годов, и совместные испытания сравнимых с ними обычных ТДС при обычных и более тяжелых условиях эксплуатации продемонстрировали, что ТДС ядерного класса обычно в два раза превышают показатели датчиков коммерческого класса в отношении своей работоспособности и отсутствия неполадок в работе.

В начале 1970-х годов, в период максимального развития атомной энергетики в США, почти все ТДС, связанные с обеспечением безопасности АЭС типа PWR, поставлялись фирмой Rosemount. С течением времени, другие производители вышли на рынок, а Rosemount свое присутствие постепенно уменьшила. ТДС этой компании тем не менее до сих пор используются на некоторых АЭС с реакторами типа PWR, сослужив

прекрасную службу атомной промышленности. Опыт использования в атомной промышленности ТДС других изготовителей также положителен. Однако, когда в 1980-х годах доля продукции компании Rosemount на рынке уменьшилась, возникли проблемы при выходе на рынок новых изготовителей ТДС ядерного класса. Эти трудности были в конце концов преодолены после того, как новые изготовители приобрели опыт в проектировании, изготовлении и тестировании ТДС ядерного класса; тем не менее представляет интерес перечень проблем, с которыми обычно приходилось встречаться при использовании ТДС на АЭС:

1. Ухудшение динамической характеристики
2. Повреждение соединительных линий
3. Низкое сопротивление изоляции
4. Преждевременный выход из строя
5. Ошибочные калибровочные таблицы
6. Незакрепленные или некачественные контакты
7. Большие ошибки, вызываемые ЭДС
8. Разрыв чувствительного элемента
9. Утончение платиновой проволоки
10. Дисбаланс соединительных проводов
11. Проникновение химических загрязнений из соединительной головки в термоканал
12. Трещины в термоканале
13. Ошибки в показаниях

Обзор этих проблем приведен ниже.

4.4.1. Динамическая характеристика

Как было указано выше, время реакции ТДС первого контура измеряют на АЭС с реакторами типа PWR периодически, используя метод испытания без демонтажа, известный как *метод РСПТ*, описываемый в главе 6. Этот метод позволил обнаружить многочисленные случаи, когда ТДС, установленные на АЭС, не отвечали требованиям к их времени реакции.

В таблице 4.2 приведены три примера, когда требования к времени реакции для ТДС на АЭС не были выполнены. Заметим, что в примерах рассмотрены ТДС трех различных изготовителей и что эти неисправности

Таблица 4.2. Примеры неисправностей, ухудшающих время реакции ТДС на АЭС

Время реакции (секунды)				
АЭС	Год	Ожидаемое	Измеренное	Изготовитель
А	1978	5,4	21	Х
В	1984	4,5	37	У
С	1988	3,6	12	Z

имели место на трех различных АЭС. Причинами почти всех подобных случаев являлись: плохой контакт на чувствительной оконечности датчика, в частности, загрязненность ТДС; загрязненность термоканалов; отложения, оставшиеся от использования в термоканале компаундов для улучшения теплопередачи; а также несоблюдение допусков на размеры ТДС и (или) термоканала.

Для измерения времени реакции ТДС был использован метод РСПТ без демонтажа во время нормальной работы АЭС.

4.4.2. Повреждение соединительных линий

Эта проблема возникла в начале 1980-х годов, когда стали появляться новые фирмы-изготовители ТДС ядерного класса. Чаще всего неисправности соединительных линий возникали из-за низкокачественной пайки серебром внутри ТДС, где провода ТДС прикреплялись к соединительным проводам, выходившим из датчика.

4.4.3. Низкое сопротивление изоляции

Обычно большинством изготовителей считается, что сопротивление изоляции (СИ) промышленных ТДС должно составлять не менее 100 мегаом при комнатной температуре (20°C) и при напряжении 100 В постоянного тока. Большинство ТДС ядерного класса уверенно отвечают этому требованию, и их СИ часто находится в гигаомном диапазоне или выше; однако, если в ТДС проникает влага, значение СИ может упасть вплоть до нескольких килоом. Часто даже очень большое падение СИ остается незамеченным, если его не измерять, — поэтому перед установкой ТДС в технологическое оборудование АЭС его следует испытать, чтобы убедиться в достаточно высоком СИ.

4.4.4. Преждевременный выход из строя

В начале 1980-х годов, когда стали появляться новые фирмы-изготовители, в одной из партий ТДС ядерного класса, поставленной одним из

признанных изготовителей, наблюдался выход из строя около 50% датчиков в начале срока их службы. С тех пор, однако, интенсивность отказов новых ТДС ядерного класса существенно снизилась.

4.4.5. Ошибочные калибровочные таблицы

Наблюдались случаи, когда калибровочные таблицы для различных партий ТДС были перепутаны изготовителем, и на АЭС поступала партия ТДС с калибровочными таблицами, относящимися к другой партии.

4.4.6. Незакрепленные или некачественные контакты

В электрической цепи ТДС имеется несколько переходных участков по пути от места измерения температуры до приборных стоек в помещении пульта управления. На этом пути находятся клеммные панели, сварные или спаянные соединения, а также сращивания; в этих местах часто обнаруживались незакрепленные или некачественные соединения.

4.4.7. Большие ошибки, вызываемые ЭДС

Электродвижущая сила (ЭДС) представляет собой напряжение, которое может возникнуть в контуре ТДС, если в датчике имеются различные металлы, находящиеся в месте перепада температур внутри ТДС. При этом сопротивление ТДС будет зависеть от того, в каком направлении его измерять; если это сделать при одном направлении тока, а затем повторить при противоположном, то результаты будут слегка различаться. В таблице 4.3 показаны результаты лабораторного опыта, в котором измерения выполнялись для шести ТДС ядерного класса двух различных изготовителей. Эти ТДС помещались в масляную ванну вместе со стандартным ТДС, которыми измерялась температура масла. Сигнал от каждого ТДС измерялся при обычном и противоположном направлениях электрического тока. Измерялось также напряжение на выходе ТДС при разорванной цепи. Для изготовителя А все три ТДС показали напряжение ЭДС, равное 80 мВ, а их показания температуры зависели от направления тока. Для изготовителя В не наблюдалось влияния ЭДС, и почти не было различия между значениями температуры, полученными при измерениях с разным направлением тока. Таким образом, возникновение ЭДС приводит к ошибке в измерении температуры и, если это происходит, то правильное значение температуры может быть все же получено путем усреднения результатов двух измерений. В прецизионной термометрии для измерения сопротивлений используются мосты переменного, а не постоянного тока. Это объясняется тем, что при использовании моста переменного тока любая ЭДС, возникающая в цепи, не оказывает влияния на измерения,

Таблица 4.3. Пример ошибок, вызываемых ЭДС при использовании ТДС на АЭС

Температура масляной ванны (°C)				
Номер ТДС	Стандартный ТДС	Прямая полярность	Обратная полярность	ЭДС (мкВ)
Изготовитель А				
A-1	285,33	285,59	285,45	80
A-2	293,59	293,83	293,66	80
A-3	300,36	300,62	300,41	80
Изготовитель В				
B-1	285,33	285,28	285,28	0
B-2	293,59	293,56	293,58	0
B-3	300,36	300,33	300,31	0

и в результате получается истинное значение сопротивления ТДС. По существу, мост переменного тока позволяет как бы измерить сопротивление ТДС при двух противоположных направлениях тока и показать среднее значение этих двух измерений.

4.4.8. Разрыв чувствительного элемента

Платиновая проволока чувствительного элемента ТДС отличается высокой хрупкостью и может треснуть или разорваться под влиянием вибрации, механической нагрузки и взаимодействия с другим материалом, присутствующим в ТДС. На рис. 4.11 показана фотография элемента ТДС ядерного класса, сделанная при помощи электронного микроскопа, а на рис. 4.12 приводится такая же фотография платинового чувствительного элемента другого ТДС ядерного класса, в котором произошел разрыв. Обычно слабыми местами, где происходит разрыв чувствительных элементов ТДС, являются места сварки или изгиба чувствительного элемента.

Отказу ТДС из-за разрыва чувствительных элементов иногда предшествуют неустойчивые показания датчика, при которых сигнал ТДС демонстрирует большой разброс значений, резкие отклонения и произвольный дрейф. На рис. 4.13 показаны данные on-line мониторинга четырех ТДС на горячем участке контура охлаждения АЭС с реактором типа PWR. Показания одного из четырех датчиков неустойчивы. Примерно через месяц после того, как были зарегистрированы эти данные, ТДС вышел из строя из-за разрыва чувствительного элемента и был заменен. Интересно отметить, что упомянутое выше поведение датчика не было замечено эксплуатационным персоналом станции, так как

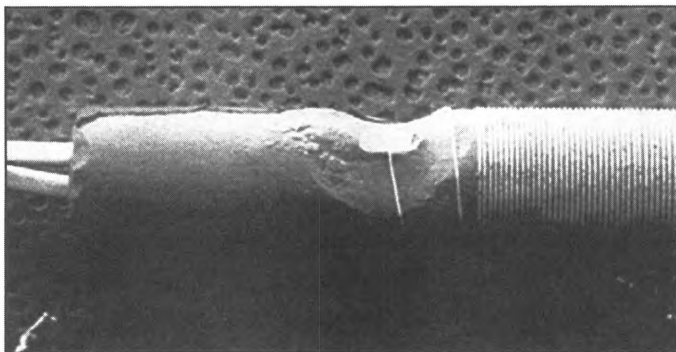


Рис. 4.11. Фотография чувствительного элемента ТДС ядерного класса сделанная при помощи электронного микроскопа

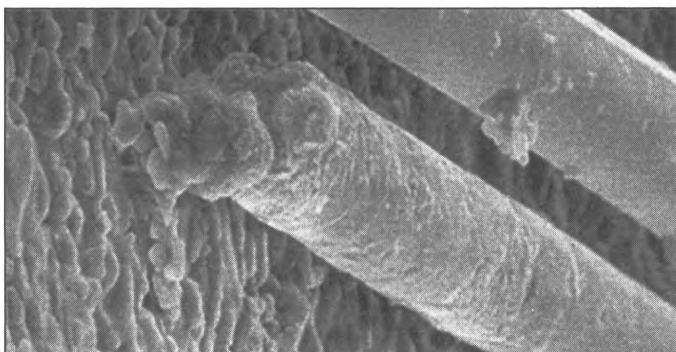


Рис. 4.12. Фотография разорванной платиновой проволоки ТДС ядерного класса, сделанная при помощи электронного микроскопа



Рис. 4.13. Неустойчивые показания ТДС первого контура теплоносителя на АЭС с реактором типа PWR, предшествовавшие выходу датчика из строя

во время ежедневных проверок измерительной системы неисправность ТДС не замечалась, ибо его показания хорошо согласовывались с данными трех остальных ТДС, и он удовлетворял требованиям входного контроля.

4.4.9. Утончение платиновой проволоки

Утончение проволоки чувствительных элементов ТДС ядерного класса происходило вследствие коррозии, вызывавшейся химическими соединениями, применявшимися для очистки элементов при их изготовлении или во время сборки датчика. Это приводило к уменьшению поперечного сечения проволоки и увеличению ее сопротивления.

Утончение проволоки может также происходить в результате химического взаимодействия между чувствительным элементом и изоляционным материалом ТДС.

4.4.10. Дисбаланс соединительных проводов

Эта неисправность может возникать в трехпроводных ТДС, присоединенных для измерения температуры к трехпроводным мостам Уитстона. Оба провода, соединяющие концы чувствительного элемента ТДС с плечами моста, должны иметь равные сопротивления. В противном случае, измерение сопротивления ТДС может дать ошибочный результат. Аналогичная неисправность может иметь место в ТДС с холостыми компенсационными проводами.

4.4.11. Проникновение химических загрязнений в термоканал

Соединительная головка некоторых ТДС заполняется пеноматериалом для выполнения требований, предъявляемых к ТДС ядерного класса. На АЭС были отмечены проблемы с такими ТДС, в том числе ухудшение времени реакции датчика, когда химическое соединение пеноматериала проникало в термоканал ТДС.

4.4.12 Трещины в термоканале

Глубина установки ТДС в трубопроводы с теплоносителем должна учитывать силы, с которыми поток рабочей среды действует на датчик, а также механическую прочность ТДС в сборе с термоканалом. Были отмечены случаи, когда действие на сборку ТДС/термоканал потока теплоносителя приводило к искривлению датчика и появлению в нем трещин, что увеличивало вероятность возникновения аварии с потерей теплоносителя, или к полному отрыву датчика от места его установки в трубопроводе.

4.4.13 Ошибки в показаниях

По разным причинам у ТДС ядерного класса наблюдались значительные неисправности, приводившие к ошибкам в их показаниях. В таблице 4.4 приведены примеры некоторых наиболее серьезных ошибок в показаниях ТДС, которые автор наблюдал на АЭС в США, а также указаны их причины.

Таблица 4.4. Примеры некоторых наиболее серьезных неисправностей, относящихся к показаниям ТДС на АЭС

Ошибка в показаниях (°C)	Причина
4	Дрейф калибровки за два года
0,6	Влияние ЭДС
2,7	Различие между двумя элементами сдвоенного ТДС
0,6	Плохая экранировка проводов
3,3	Загрязнение контактов ТДС
1,1	Низкое сопротивления изоляции

4.5. Неисправности термопар на выходе из активной зоны

На АЭС с реакторами типа PWR на выходе из активной зоны обычно устанавливают от 50 до 60 термопар. Неофициальная оценка автором работоспособности этих термопар на почти 50 АЭС, приводит к следующим выводам:

- От 10 до 20 процентов термопар на выходе из зоны на АЭС с реакторами типа PWR выходят из строя в течение первых 20 лет работы станции. Отказы выражаются в виде большого калибровочного дрейфа (например, ошибки от 10 до 30°C при температуре 300°C), неустойчивого и с высоким уровнем помех сигнала или достижения сигналом предельного значения из-за насыщения.
- У некоторых термопар возникает неисправность в соединительных кабелях, хотя сами термопары остаются исправными. Известны случаи, когда на станциях заменяли термопару на выходе из зоны, а впоследствии обнаруживалось, что неисправность была не в ней, а в соединительных проводах, разъемах или еще где-нибудь в электрической цепи. Поэтому, прежде чем заменять термопару, следует провести проверку кабеля с целью отличить неисправности кабеля и/или соединительных разъемов от неисправностей термопары.

- Термопары могут быть случайно присоединены с неправильной полярностью, т.е. положительный и отрицательный провода могут быть перепутаны при установке термопары или присоединении к ней проводов. В этих случаях при комнатной температуре показания термопары могут показаться нормальными, но когда температура повысится, термопара покажет отрицательное значение.

На одном из заводов по изготовлению топлива в США инженеры попытались исправить присоединение термопары с нарушением полярности путем изменения порядка присоединения ее соединительных проводов к прибору-индикатору. Сначала казалось, что термопара давала правильные показания при комнатной температуре, но когда температура технологического процесса начала повышаться, ее показания стали отрицательными. Тогда порядок присоединения проводов термопары к прибору-индикатору поменяли на противоположный, что позволило получить положительные и, казалось, правильные значения при низких температурах. Однако, когда температура выросла, показания термопары стали все более и более отставать от реального значения температуры технологического процесса до такой степени, что при температуре примерно 600°C она показывала 450°C . По этой причине на заводе по изготовлению топлива возник пожар.

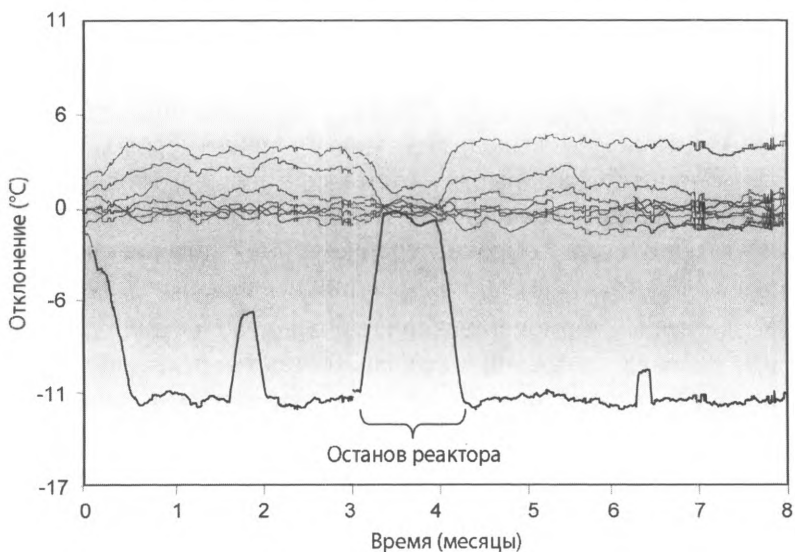


Рис. 4.14. Результаты мониторинга в режиме on-line группы термопар на выходе из активной зоны

Данное происшествие документировано в Информационном уведомлении NRC (номер IN-96-33).

- Даже правильно присоединенные термопары могут давать верные показания при комнатной температуре, но отклоняться от истинной температуры по мере разогрева. На рис. 4.14 представлены результаты мониторинга в режиме on-line группы термопар на АЭС с реактором типа PWR. Видно, что показания термопар сравнимы друг с другом в состоянии холодного останова станции, но одна термопара дает показания, существенно отличающиеся от остальных при достижении установкой рабочей температуры.
- Время реакции термопар может существенно ухудшаться по мере старения. В таблице 4.5 показаны результаты измерения времени реакции идентичных термопар на выходе из зоны на четырех похожих АЭС с реакторами типа PWR. Заметим, что среднее время реакции термопар после первых 10 лет работы составило примерно 1 с, а после еще 20 лет работы достигло примерно 2 с, т.е. увеличилось на 100%. Это несущественно для эксплуатации или обеспечения безопасности работы станции, но показывает, что по мере старения термопар время реакции увеличивается. Подобное явление и другие схожие наблюдения привели к тому, что на некоторых АЭС стали проводить измерение времени реакции термопар для контроля над процессом старения. В частности, важно установить реперные значения времени реакции термопар для новой станции или когда термопары только что установлены, а затем периодически (например, раз в пять лет) повторять измерения для выявления ухудшения характеристик датчиков по сравнению с номинальными.

Таблица 4.5. Результаты изучения изменений характеристик термопар на выходе из зоны на АЭС с реакторами типа PWR

АЭС	Годы работы	Время реакции термопар (с)		
		Среднее	Наибольшее	Наименьшее
A	30	2,01	2,9	0,6
B	30	1,96	2,8	0,6
C	10	0,97	1,5	0,5
D	10	1,10	1,5	0,6

- Обычно термопары не так точны, как ТДС. Это частично объясняется тем, что калибруют не термопары индивидуально, а провод-

ники, используемые для изготовления, или представительную выборку из большой партии термопар, и эту калибровку используют для всех термопар в партии. В таблице 4.6 представлены оценки точности измерения температур при помощи промышленных термопар в диапазоне от 50 до 500°C.

Таблица 4.6. Потенциальные источники и оценка ошибок при измерениях температуры в промышленных условиях при помощи термопар (в диапазоне от 50 до 500 °C)

Источник ошибки	Сокращение	Диапазон ошибки
Собственные ошибки термопары	(СОТ)	±0,5 до 5 °C
Ошибка компенсации холодного спая	(КХС)	±0,1 до 0,5 °C
Аналого-цифровое преобразование	(АЦП)	±0,1 до 0,2 °C
Ошибки воспроизводимости	(шум)	±0,1 до 0,5 °C

Полная ошибка = (СОТ) + (КХС) + (АЦП) + (шум) + (другие)

Другие ошибки = допуска на соединительные провода, их несоответствие, заземление и т.п.

МЕТОД ПЕРЕКРЕСТНОЙ КАЛИБРОВКИ

5.1. Общие сведения

На большинстве АЭС с реакторами типа PWR проверку калибровки резервированных датчиков, таких как ТДС в первом контуре охлаждения, проводят регулярно с целью обнаружения и устранения любого недопустимого дрейфа калибровки или ее изменения. Для этих целей используют метод перекрестной калибровки, он прост и одобрен официально регулирующими органами США (NRC), Великобритании (British Nuclear Installation Inspectorate) и других стран.

Более сложным и потенциально более точным методом, также подходящим для калибровки ТДС без демонтажа, является метод, известный под названием метода шума Джонсона [6]. Уже около тридцати лет Окриджская национальная лаборатория и Национальный институт стандартов и технологии США, а также организации в Австралии, Германии и других странах работают над применением метода шума Джонсона в промышленных условиях, однако метод все еще находится в стадии разработки и на АЭС не применяется. Следует отметить, что метод шума Джонсона применим не только для калибровки ТДС без демонтажа, он может явиться основой для разработки нового и возможно очень точного датчика для измерений высоких температур.

Термометр, работающий по методу Джонсона, обычно состоит из ТДС со сложным электронным блоком, позволяющим измерять очень слабый (порядка нановольт) выходной электрический сигнал, возникающий

в чувствительном элементе ТДС и зависящий от температуры окружающей ТДС среды. Трудность, которая должна быть преодолена при промышленном использовании метода шума Джонсона на АЭС и других установках, состоит в измерении слабого сигнала на конце длинных проводов в условиях реальных технологических процессов.

В последнее время для более эффективного использования в атомной промышленности метод перекрестной калибровки был улучшен и автоматизирован. Эти улучшения включают в себя следующее: 1) аналитические алгоритмы для введения поправок в данные перекрестной калибровки в связи с какими-либо существенными отклонениями от установившегося температурного режима во время сбора этих данных; 2) поправки на разницу температур между петлями первого контура теплоносителя и между горячими и холодными участками петель; 3) расчет неточностей, характеризующих результаты перекрестной калибровки; 4) инновационные способы обращения с теми датчиками, которые не удовлетворяют критериям отбора для тестирования методом перекрестной калибровки; 5) методы выборки данных из стационарного компьютера с целью использования их для перекрестной калибровки; и 6) надежные алгоритмы перекрестной калибровки на основе обработки результатов измерений во время линейных изменений температур при пуске и останове станции.

5.2. Основа метода

Метод перекрестной калибровки является способом проверки калибровки группы взаимодублируемых датчиков, которые измеряют одни и те же технологические параметры. Основной принцип метода заключается в регистрации показаний взаимодублируемых датчиков, вычислении среднего значения этих показателей и расчете отклонения показаний каждого датчика от среднего значения за вычетом возможных выбросов. Метод может применяться для ТДС с узкими и широкими рабочими диапазонами, а также для термопар на выходе из активной зоны. Обычно, критерии применимости намного более строгие для ТДС узкого диапазона, чем для ТДС широкого диапазона, а критерии для ТДС широкого диапазона существенно более строгие, чем для термопар.

В таблице 5.1 представлены результаты типичной проверки датчиков методом перекрестной калибровки, проведенной на АЭС. Данные для этой проверки были собраны в изотермальных условиях во время разогрева станции при температуре примерно 280°C. Представленная распечатка, известная под названием *прогон перекрестной калибровки*,

обычно включает в себя четыре серии данных, полученных от одного датчика. После того как данные для одного прогона собраны, для каждого датчика вычисляется среднее значение результатов четырех измерений, которое записывается в столбец «Средняя температура». В примере, представленном в таблице 5.1, значения средних температур для всех ТДС узкого диапазона осредняются, а полученный результат вычитается из каждого индивидуального среднего значения для

Таблица 5.1. Предварительные результаты типичного прогона перекрестной калибровки

ТДС	Температура (°C)				Средняя темп-ра (°C)	Откло-нение (°C)
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4		
ТДС узкого диапазона						
1	280,3278	280,3274	280,3087	280,2956	280,315	−0,063
2	280,4091	280,3942	280,3853	280,3797	280,392	0,014
3	280,3616	280,3621	280,3426	280,3305	280,349	−0,029
4	280,3660	280,3655	280,344	280,3347	280,353	−0,026
5	280,4729	280,4599	280,4608	280,4571	280,463	0,084
6	280,3664	280,3329	280,3427	280,3274	280,342	−0,036
7	280,3392	280,3276	280,3230	280,3178	280,327	−0,051
8	280,4709	280,4574	280,4504	280,4453	280,456	0,078
9	280,3308	280,3312	280,3047	280,3029	280,317	−0,061
10	280,4369	280,4355	280,4081	280,4118	280,423	0,045
11	280,3765	280,3584	280,3477	280,3440	280,357	−0,022
12	280,4593	280,4584	280,4375	280,4296	280,446	0,068
ТДС широкого диапазона						
13	280,0733	280,0612	280,0538	280,0352	280,056	−0,322
14	280,6964	280,6871	280,6741	280,6602	280,679	0,301
15	280,3290	280,3281	280,3067	280,3039	280,317	−0,061
16	280,4881	280,4899	280,4704	280,4686	280,479	0,101
Термопары на выходе из зоны						
17	280,6723	280,6674	280,6261	280,6431	280,652	0,274
18	280,6301	280,6082	280,5928	280,6025	280,608	0,230
19	280,7786	280,7802	280,7640	280,7526	280,769	0,390
20	280,5482	280,5660	280,5474	280,5474	280,552	0,174
21	280,8232	280,8110	280,7940	280,7907	280,805	0,426
22	280,8978	280,8588	280,8483	280,8248	280,857	0,479
23	280,7680	280,7607	280,7445	280,7380	280,753	0,374
24	281,1411	281,1394	281,1394	281,1086	281,132	0,754
25	280,8037	280,7940	280,7510	280,7656	280,779	0,400

Столбец «Отклонение» содержит для каждого датчика результат вычитания из средней температуры датчика средней температуры ТДС узкого диапазона.

Средняя температура, показанная группой ТДС узкого диапазона = 280,378 °C.

того, чтобы получить «отклонение» среднего показания каждого датчика от среднего значения показаний ТДС узкого диапазона. Столбец «Отклонение» содержит результаты данного прогона перекрестной калибровки. Эти результаты называют *предварительными результатами проверки перекрестной калибровкой*. Обычно полученные данные подвергаются дальнейшему изучению, как это описывается ниже в разделе 5.4 данной главы, чтобы получить окончательные данные тестирования методом перекрестной калибровки и провести количественную оценку погрешности результатов определения отклонений. Окончательные результаты включают в себя необходимые поправки на какие-либо значительные отклонения от установившегося температурного режима и на неоднородность распределения температуры рабочей среды во время сбора данных для перекрестной калибровки.

ТДС узкого диапазона обычно являются наиболее точными температурными датчиками на АЭС с реакторами типа PWR и поэтому используются для определения реперной температуры при проведении перекрестной калибровки. На некоторых станциях перекрестную калибровку проводят только для таких ТДС, на других проведение перекрестной калибровки распространяют также на ТДС широкого диапазона и (или) на термопары, установленные на выходе из активной зоны.

Любой ТДС узкого диапазона, дающий показание, отклоняющееся от среднего значения более, чем на заранее установленную величину (например, $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), исключают из расчета среднего значения. Применяемые критерии разнятся для разных АЭС и обычно зависят от требований к точности определения температуры теплоносителя в первом контуре. В таблице 5.2 приведены критерии, применяемые при перекрестной калибровке ТДС на семи АЭС, причем приведены как критерии для отклонений, при которых ТДС узкого диапазона исключаются из расчета среднего значения, так и число температурных точек, для которых собираются данные перекрестной калибровки [7].

ТДС, которые исключают из расчета средней температуры, называют *выбросами*; их либо заменяют, либо для них рассчитывают новую калибровочную таблицу, используя данные проведенной перекрестной калибровки. Процедура для перекалибровки ТДС, определенных как выбросы, описывается ниже в разделе 5.13.

Таблица 5.2. Критерии для перекрестной калибровки ТДС на различных АЭС с реакторами типа PWR

АЭС	Температурные точки	Критерии для выбросов (°C)	Примечания
1	1	0,17	1
2	1	0,17	1
3	4	0,11	2
4	2	0,30	3
5	4	0,27	4
6	1	0,17	5
7	4	0,11	6

Критерий постоянства температуры, принятый на АЭС для перекрестной калибровки ТДС, обычно составляет примерно от $\pm 0,15$ до $\pm 0,3$ °C.

Столбец «Температурные точки» указывает число значений температуры, для которых собирают данные перекрестной калибровки.

Примечания:

1. Данные для перекрестной калибровки собираются для любого числа значений температуры, соответствующих установившемуся температурному режиму. Однако для того, чтобы выполнить технические требования и откорректировать датчики, насколько это необходимо, используются только данные для 292 °C.
2. Данные могут собираться при постоянной скорости повышения температуры. Для 16 ТДС данные собирают в следующем порядке: для ТДС с 1 по 16, затем с 16 по 1 при изменении направления тока на противоположное, далее опять при изменении направления тока для ТДС с 1 по 16 и т.д. Считается, что такой порядок вносит поправки, учитывающие как линейное повышение температуры, так и влияние ЭДС (для чего направление тока меняется). Данные собирают в районе температур 95°C, 170°C, 230°C и 292°C.
3. Установившиеся значения температуры: 170°C и 292°C. Если отклонения превышают 0,17°C, то отклонения для температур 170°C и 292°C используются, чтобы определить смещение для компенсации ошибки и наклона калибровочной кривой и использовать эти поправки для корректировки датчика.
4. Данные собираются при четырех температурах, последовательно для 16 ТДС: с 1 по 16, с 16 по 1 и т.д. Также измеряется скорость повышения температуры.
5. На этой станции 16 ТДС испытываются, собирая за один раз данные для одного измерительного канала (четыре ТДС на канал). Данные собираются в течение 25 минут, с пятиминутными интервалами. Эта процедура повторяется для всех четырех каналов. Критерий постоянства температуры для испытаний на этой АЭС составляет

0,17°С (т.е., температура не может меняться более, чем на 0,17°С от начала до конца каждой серии испытаний).

6. *Испытания проводятся при температурах 120°С, 180°С, 230°С и 275°С. Данные собираются для 16 ТДС: с 1 по 16, с 16 по 1, с 1 по 16 и с 16 по 1. На основании четырех калибровочных точек определяются начальная точка и наклон калибровочной кривой для поправок к калибровке датчиков.*

5.3. Источники данных для перекрестной калибровки

Данные для перекрестной калибровки могут быть получены при помощи специально предназначенной для этого системы сбора данных или отобраны из станционного компьютера. На рис. 5.1 показана диаграмма движения данных для реализации метода перекрестной калибровки для этих двух способов. В следующих двух разделах описываются подробности каждого способа.

5.3.1. Специальная система сбора данных

Для сбора данных для перекрестной калибровки при помощи специальной системы сбора информации доступ к датчикам обычно организуют через шкафы приборов технологического контроля, расположенные в зоне пульта управления станцией. На рис. 5.2 показана упрощенная схема системы для получения данных для перекрестной калибровки. Датчики временно отсоединяют от штатного измерительного оборудования и присоединяют к испытательному оборудованию, используемому для процедуры перекрестной калибровки, которая заключается в следующем:

1. Поочередно подсоединить систему ко всем датчикам, измерить их сигналы, и, если надо, преобразовать эти сигналы в соответствующие значения температур. Этот шаг позволяет получить одну серию данных перекрестной калибровки. Для перехода от сопротивлений к температуре, если это необходимо, использовать уравнение Кэллендера (или ему эквивалентное).
2. Повторить шаг 1 для получения четырех серий данных.
3. Вычислить среднее значение четырех измерений для каждого датчика.
4. Вычислить среднее значение температур, полученных в шаге 3, для всех ТДС узкого диапазона.

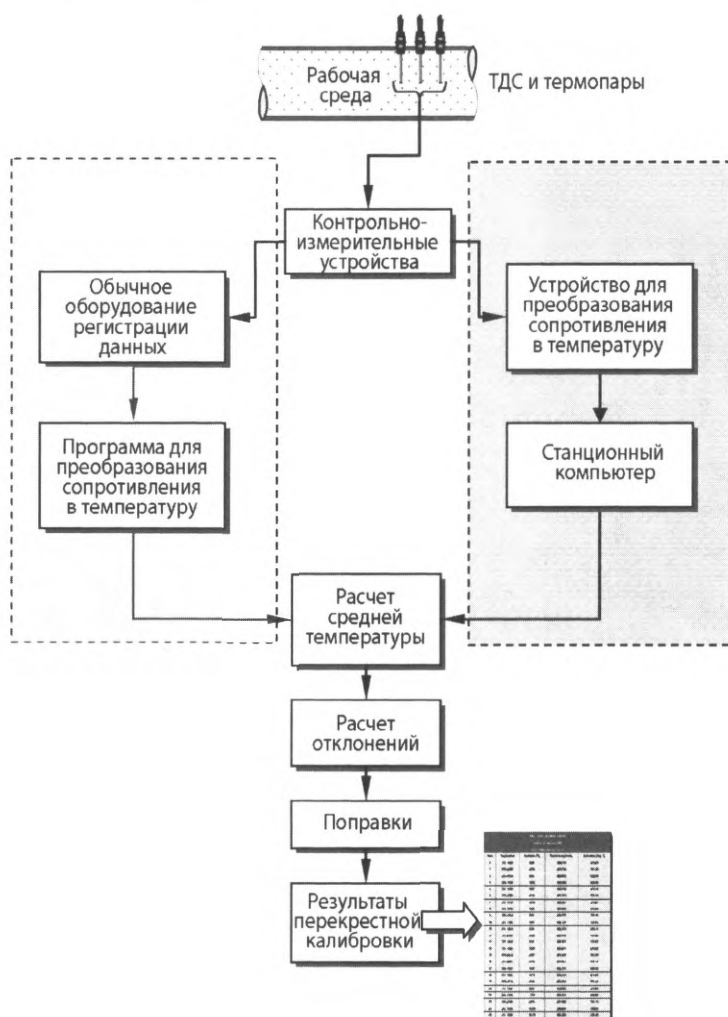


Рис. 5.1. Варианты сбора данных для перекрестной калибровки

5. Определить отклонения каждого датчика ДТ; для этого из показаний температуры для каждого датчика вычесть среднюю температуру, полученную в шаге 4.
6. Если отклонение для какого-либо ТДС узкого диапазона превышает заранее установленную величину (например, $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$), исключить среднее значение температуры, полученное в шаге 3 для этого датчика и повторить шаг 4. ТДС, который исключается из расчета среднего значения, именуется *выбросом*.
7. Повторять шаг 6 до тех пор, пока из вычисления среднего значения не будут исключены все выбросы.

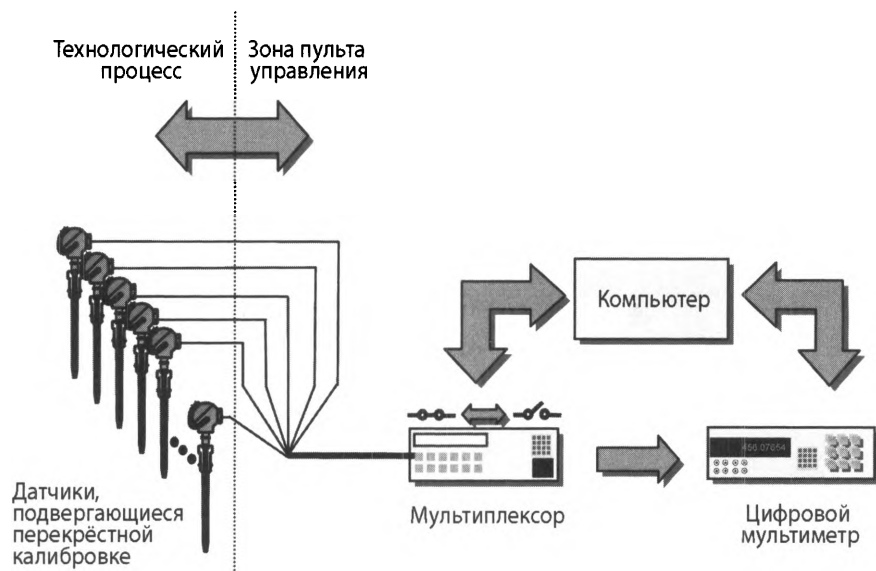


Рис. 5.2. Схема оборудования для перекрестной калибровки

В результате этой процедуры получают предварительные результаты одного прогона перекрестной калибровки. Как будет показано ниже в разделе 5.4, следует провести дополнительный анализ для увеличения надежности результатов путем введения в данные поправок на какие-либо отклонения от установленного температурного режима и на неоднородность распределения температур рабочей среды во время сбора данных. Дополнительный анализ позволит получить окончательные результаты перекрестной калибровки, а также предоставит информацию для определения погрешности результатов.

Эта процедура из семи шагов носит название *традиционной перекрестной калибровки* и иллюстрирована на рис. 5.3.

Для преобразования сопротивления в температуру, если необходимо (см. шаг 1 выше), наиболее часто используют уравнение Кэллендера. Для температур выше 0 °C это уравнение записывается в следующем виде:

$$\frac{R(T)}{R(0)} = 1 + \alpha \left[T - \delta \left\{ \left(\frac{T}{100^\circ\text{C}} \right)^2 - \left(\frac{T}{100^\circ\text{C}} \right) \right\} \right] \quad (5.1)$$

где:

T – температура (°C)

$R(0)$ – сопротивление при 0°C (Ом)

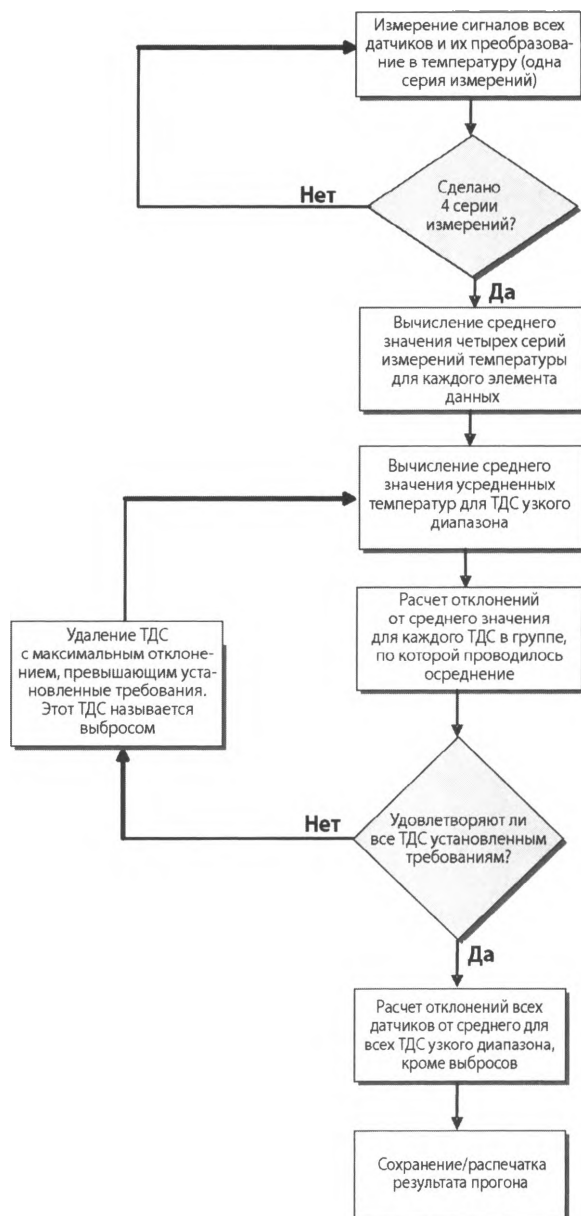


Рис. 5.3. Блок-схема процедуры перекрестной калибровки с использованием специальной системы получения данных

α – калибровочная константа (Ом/Ом/°C)

δ – калибровочная константа (°C)

$R(T)$ – сопротивление при температуре T (Ом)

Члены уравнения $R(0)$, α и δ называют константами уравнения Кэллендера, где α – средний температурный коэффициент сопротивления в диапазоне от 0 до 100°C; δ – показатель того, насколько график зависимости сопротивления от температуры отклоняется от прямой линии. Эти две константы, а также $R(0)$ обычно определяют для каждого ТДС при его калибровке в термостате при лабораторных испытаниях. Как только эти три константы определены, они подставляются в уравнение 5.1 для получения калибровочной таблицы для данного ТДС.

На некоторых АЭС с реакторами типа PWR конструкции фирмы Вестингауз вместо уравнения Кэллендера используют полином второго порядка, называемый «эталонной функцией Вестингауза» и записываемый в следующем виде:

$$R(T) = Ref(T) + \text{смещение} + \text{наклон} (T - 525) \quad (5.2)$$

$$Ref(T) = 185,807 + 0,444693T + 0,000036082T^2 \quad (5.3)$$

где:

$R(T)$ – сопротивление ТДС (Ом) как функция температуры (Т),

$Ref(T)$ – эталонная функция

Смещение и *наклон* – константы эталонной функции Вестингауза (полученные в результате калибровки ТДС).

Эталонная функция Вестингауза имеет постоянную кривизну и использует линейную поправку для достижения соответствия калибровочной кривой ТДС. Значения температуры (Т) в уравнениях 5.2 и 5.3 задаются в градусах по Фаренгейту (°F).

5.3.2. Данные из стационарного компьютера

АЭС часто оснащены техническими средствами для сбора и хранения сигналов технологических датчиков. Эти данные могут быть извлечены при помощи коммерческих пакетов управления базами данных, например таких как: 1) пакет PI Software© (компания OSISoft) и 2) пакет eDNA Software© (компания InStep Software).

Для доступа к массиву данных стационарного компьютера обычно используют программу, называемую «Мост передачи данных» (Data Bridge). Эта программа помогает получить данные о датчиках, хранящиеся на серверах стационарной системы управления базами данными. Эти данные затем анализируют на отдельном компьютере; на рис. 5.4 показана блок-схема получения и анализа данных перекрестной калибровки

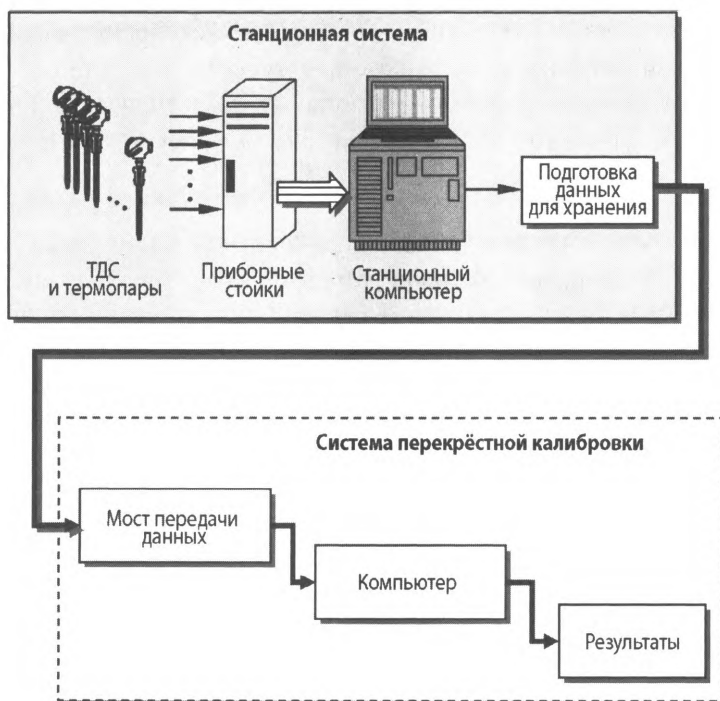


Рис. 5.4. Блок-схема получения данных для перекрестной калибровки из стационарного компьютера

с использованием информации из стационарного компьютера. Этот компьютер обычно производит выборку сигналов станционных датчиков, преобразует их в температуру и выполняет их хранение. Интервал отбора данных зависит от АЭС и обычно составляет от одной до десяти секунд для ТДС и от десяти до шестидесяти секунд для термопар на выходе из зоны.

5.4. Подробный анализ данных перекрестной калибровки

Процедура перекрестной калибровки, описанная выше, позволяет провести предварительный анализ первичных данных калибровки и получить предварительные результаты испытания датчиков этим методом независимо от того, была ли использована специальная система сбора данных, или данные были получены путем отбора от стационарного компьютера. Для получения более точных результатов в первичные данные следует внести поправки на любые существенные отклонения температуры, которые могли иметь место во время сбора данных. Этот процесс называют *внесением поправок на нестабильность температуры*.

Кроме этого, первичные данные должны быть скорректированы, если имелись значительные различия температуры между петлями первого контура теплоносителя или между температурами горячего и холодного участков контура. Это называется *внесением поправок на неоднородность температуры*.

При подробном анализе данных перекрестной калибровки сначала вносят поправки на нестабильность и на неоднородность температуры, и затем данные анализируют повторно с целью получения окончательных результатов. Когда поправки внесены, рассчитывают также погрешность результатов калибровки.

5.4.1 Калибровка данных перекрестной калибровки

Перекрестная калибровка ТДС на АЭС основана на предположении, что когда установка находится в изотермическом состоянии средняя температура достаточного числа взаимодублируемых ТДС отражает истинную температуру технологического процесса. На справедливость этого предположения могут негативно влиять несколько факторов:

1. Ошибки в таблицах зависимости сопротивления от температуры, использующихся в испытаниях перекрестной калибровки для преобразования сопротивления ТДС в температуру.
2. Систематический дрейф калибровки ТДС, который может происходить, когда все ТДС вместе имеют дрейф, направленный в одну и ту же сторону — в сторону завышения или занижения показателей (т.е., совместный дрейф).
3. Флуктуации или дрейф температуры теплоносителя первичного контура, которые могли происходить в то время, когда на станции осуществлялся сбор данных для перекрестной калибровки.
4. Неоднородность температуры в местах, где установлены взаимодублируемые ТДС. Так как метод перекрестной калибровки предполагает, что все взаимодублируемые ТДС имеют одинаковую температуру, любое существенное отклонение от этого предположения может повлечь за собой ошибки в результатах испытаний с использованием этого метода.

При тестировании методом перекрестной калибровки группы ТДС, которые использовались на станции в течение одного или более эксплуатационных циклов, можно учесть первый и последний из перечисленных выше факторов путем демонтажа одного или более датчиков и проведения их калибровки в лаборатории. Другой альтернативой является

замена одного из ТДС на вновь откалиброванный датчик и повторение тестирования перекрестной калибровкой в конце периода остановки станции, когда осуществляется ее разогрев для начала работы на мощности. Более удобный способ исключить второй фактор заключается в использовании экспериментальных данных, опубликованных в документе NUREG/CR-5560 [7]. Данные этого документа указывают на то, что дрейф группы ТДС ядерного класса имеет в основном случайный, а не систематический характер. Если принять, что это справедливо, то маловероятно, что в результатах перекрестной калибровки будут присутствовать систематические ошибки, и можно было бы считать весьма спорным второй из перечисленных выше четырех факторов. Третий и четвертый факторы, упомянутые выше, могут быть учтены при помощи методов численного расчета, как это описано в следующих двух разделах, чтобы внести в данные перекрестной калибровки поправки на нестабильность и на неоднородность температуры.

5.4.2 Поправка на нестабильность температуры

Если во время проведения испытаний методом перекрестной калибровки происходят флуктуации или дрейф температуры, то причиной этого почти всегда является то, что температура рабочей среды не может поддерживаться в точности на постоянном уровне. Выбор метода для введения поправок на нестабильность температуры зависит от режима работы станции, при котором проводился сбор данных. Если температура на станции меняется медленно и с постоянной скоростью, то тогда используют подход к сбору данных в условиях линейного изменения температуры, потому что он позволяет автоматически учесть изменения температуры, происходящие во время сбора данных. Если станцию поддерживают в устойчивом изотермическом состоянии, то используется подход к сбору данных при постоянной температуре, и поправки на температурные флуктуации вводятся при подробном анализе собранных данных.

Сбор линейно изменяющихся данных учитывает постоянные изменения температуры путем выбора ТДС в обратном порядке во время второй и четвертой серий одного прогона перекрестной калибровки. Например, для 24 ТДС порядок их выбора для регистрации показаний при проведении четырех серий испытаний будет с 1 по 24, с 24 по 1, с 1 по 24 и, наконец, с 24 по 1. При перемене направления выбора датчиков влияние линейного изменения температуры меняется на противоположное, так что любая ошибка сводится к нулю при вычислении среднего значения для четырех серий вместе.

При сборе данных в условиях поддержания температуры на одном уровне введение поправок на постоянную скорость ее изменения не является критически важным, и поэтому большее внимание уделяют ее кратковременным флуктуациям. Это крайне важно из-за изменений теплосъема, которые часто требуются для поддержания температуры на станции на постоянном уровне. В этом случае отбор данных ТДС производится в каждой серии в одном и том же порядке, что делает кратковременные флуктуации температуры более заметными.

На рис. 5.5 показан пример данных до и после внесения поправок на нестабильность температуры: представлены все значения температуры одного полного прогона перекрестной калибровки, состоящего из четырех серий получения данных. Вначале определяется прямая линия (см. рис. 5.5а), минимально отклоняющаяся от средних значений каждой серии. Эта линия является линейной регрессией от средней температуры ТДС для каждой из четырех серий прогона. Значения температур на прямой линии вычитаются из полученных данных для того, чтобы избавиться от какого-либо влияния дрейфа температуры рабочей среды. На рис. 5.5б показаны данные после введения в них поправки на наилучшее соответствие средним значениям серий. Данные на рис. 5.5б являются отклонениями температуры индивидуальных ТДС от среднего значения для всех ТДС. Если вычесть эти отклонения из значений температур, то на получающемся графике данных можно легко заметить остающиеся флуктуации температуры рабочей среды (рис. 5.5в). Эти флуктуации носят название *остаточных флуктуаций температуры*, стандартное отклонение которых используется при расчете полной погрешности результатов перекрестной калибровки, как это описывается ниже в разделе 5.8.

Для станций, на которых данные отбирают из стационарного компьютера, поправки на флуктуации производятся путем расчета стандартного отклонения для каждого набора данных и использования этого значения стандартного отклонения для исключения неприемлемых наборов данных. Соответствующая процедура выглядит следующим образом:

1. Вычислить стандартное отклонение (обозначается как СТО) для каждого индивидуального набора данных при каждой температуре.
2. Вычислить среднее значение и стандартное отклонение всех величин СТО (соответственно, $\overline{CP3}$ и σ_{CP3}).

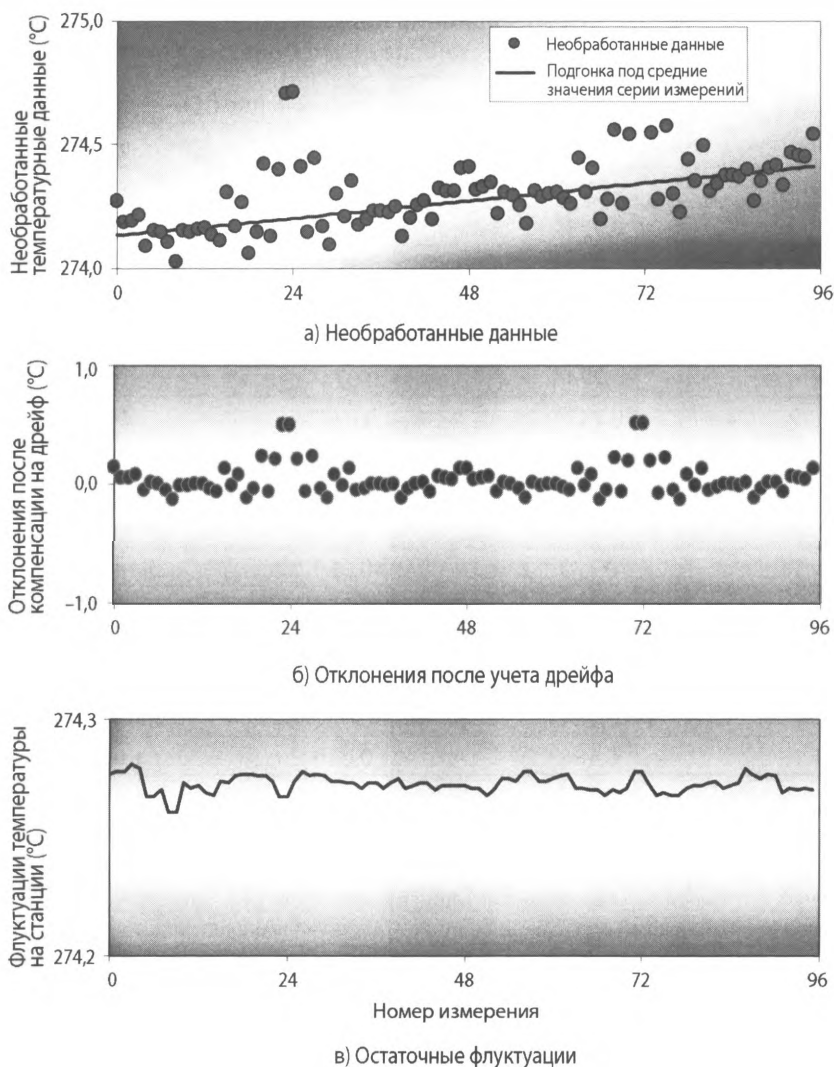


Рис. 5.5. Внесение поправки на нестабильность
в данные перекрестной калибровки

3. Рассчитать разность Δ полученных в шагах 1 и 2 величин СТО и СРЗ, т.е. $\Delta = \text{СТО} - \text{СРЗ}$ для каждого набора данных при каждой температуре.
4. Набор данных принимается для анализа, если $|\Delta|$ равно или меньше, чем $m\sigma_{\text{СРЗ}}$, где m есть множитель, обычно равный или превышающий единицу: этот множитель называют *критерием стандартного отклонения*. Если $|\Delta|$ превышает $m\sigma_{\text{СРЗ}}$, то соответствующий набор данных исключается из анализа.

Таблица 5.3. Стандартные отклонения прогонов перекрестной калибровки, рассчитанные для поправки на нестабильность

Номер прогона	Стандартное отклонение (°C)		
	171 °C	238 °C	277 °C
1	0,214	0,058	0,053
2	0,223*	0,059	0,053
3	0,231*	0,064	0,055*
4	0,209	0,071	0,052
5	0,218	0,075*	0,052
6	0,224*	0,074*	0,052
7	0,237*	0,074*	0,052
8	0,187	0,064	0,052
9	0,164	0,062	0,052
10	0,192	0,056	0,051
11	0,179	0,059	данных нет
12	0,147	0,057	данных нет
13	0,144	0,061	данных нет
14	0,142	0,061	данных нет
15	0,186	0,062	данных нет
16	0,188	0,060	данных нет
17	0,177	0,059	данных нет
18	0,178	0,059	данных нет

* Прогоны исключены, используя критерий стандартного отклонения = 1,0, что означает, что прогон исключается, если величина $|\Delta|$ для него превышает одно стандартное отклонение.

В таблице 5.3 приводится пример, включающий 18 прогонов перекрестной калибровки при трех температурах (171 °C, 238 °C и 277 °C), для которых была выполнена эта четырехступенчатая процедура. Прогоны, которые были отклонены в соответствии с указанным выше критерием, отмечены в таблице *звездочкой*.

5.4.3. Поправка на неоднородность

Поправка на неоднородность вносится для того, чтобы учесть существенные различия, которые могли возникнуть во время получения данных перекрестной калибровки между температурой горячего и холодного участков в каждой петле реактора или между различными петлями. Эти различия могут происходить в результате неполного перемешивания потоков теплоносителя или неоднородностей в теплосъеме, происходящем в парогенераторах.

Таблица 5.4. Типовой пример средних температур теплоносителя первого контура, рассчитанных для оценки неоднородности температуры

Характер осреднения	Температура (°C)					
	204	221	232	249	266	277
По всей станции	204,06	219,24	233,76	248,89	265,35	276,41
Для ТДС горячих участков	204,08	219,26	233,77	248,91	265,35	276,41
Для ТДС холодных участков	204,02	219,22	233,74	248,88	265,36	276,42
Для ТДС петли № 1	204,06	219,26	233,84	249,06	265,47	276,55
Для ТДС петли № 2	204,05	219,21	233,69	248,81	265,29	276,35
Для ТДС петли № 3	204,03	219,19	233,66	248,76	265,24	276,30
Для ТДС петли № 4	204,08	219,32	233,83	248,96	265,39	276,45

В таблице 5.4 приводятся типичные значения средних температур, рассчитанные по данным перекрестной калибровки после того, как в них была внесена поправка на нестабильность температуры рабочей среды. Эти значения используются для определения необходимости внесения поправки на неоднородность температуры. Если различия в температуре очень малы, то поправки на неоднородность не нужны. В противном случае, в данные должны быть внесены поправки на различия в температуре между ТДС, установленными на горячих и на холодных участках трубопроводов, или на различия в температуре между различными петлями контура охлаждения реактора.

5.5. Представление результатов перекрестной калибровки

После того как данные перекрестной калибровки скорректированы на нестабильность и неоднородность, если таковые имелись, их подвергают повторному анализу с целью получить окончательные (с поправками) результаты. В таблице 5.5 приведены типичные результаты перекрестной калибровки, полученные при анализе первичных и скорректированных данных. Результаты анализа первичных данных обозначены как *предварительные результаты*, а анализа скорректированных данных — как *окончательные результаты*.

Обычно поправки к данным перекрестной калибровки вносят лишь для ТДС узкого и широкого диапазонов, т. е. в данные для термпар на выходе из активной зоны поправки обычно не вносят.

Таблица 5.5. Сравнение предварительных и окончательных результатов перекрестной калибровки

Идентификатор ТДС	Результаты (°C)	
	Предварительные	Окончательные
1NCRD5420	0,133	0,087
1NCRD5421	0,044	–0,002
1NCRD5422	0,050	0,003
1NCRD5430	0,067	0,019
1NCRD5440	–0,061	–0,107
1NCRD5460	0,011	0,043
1NCRD5461	0,000	0,044
1NCRD5462	–0,050	–0,014
1NCRD5470	–0,128	–0,092
1NCRD5480	–0,006	0,029
1NCRD5500	–0,011	0,010
1NCRD5501	–0,006	0,020
1NCRD5502	0,000	0,022
1NCRD5510	–0,039	–0,014
1NCRD5520	–0,061	–0,038
1NCRD5540	0,128	0,121
1NCRD5541	–0,011	–0,020
1NCRD5542	0,083	0,076
1NCRD5550	–0,122	–0,129
1NCRD5560	–0,039	–0,048
1NCRD5850	0,217	0,171
1NCRD5860	–0,094	–0,138
1NCRD5870	0,189	0,216
1NCRD5880	0,500	0,531
1NCRD5900	0,289	0,310
1NCRD5910	–0,333	–0,313
1NCRD5920	0,639	0,632
1NCRD5930	0,256	0,249

Предварительные результаты получены при анализе первичных данных, а окончательные — скорректированных данных.

5.6. Влияние поправок на результаты перекрестной калибровки

Внесение в первичные данные поправок, учитывающих нестабильность и неоднородность температуры на АЭС, оказывает заметное влияние на окончательные результаты тестирования методом перекрестной

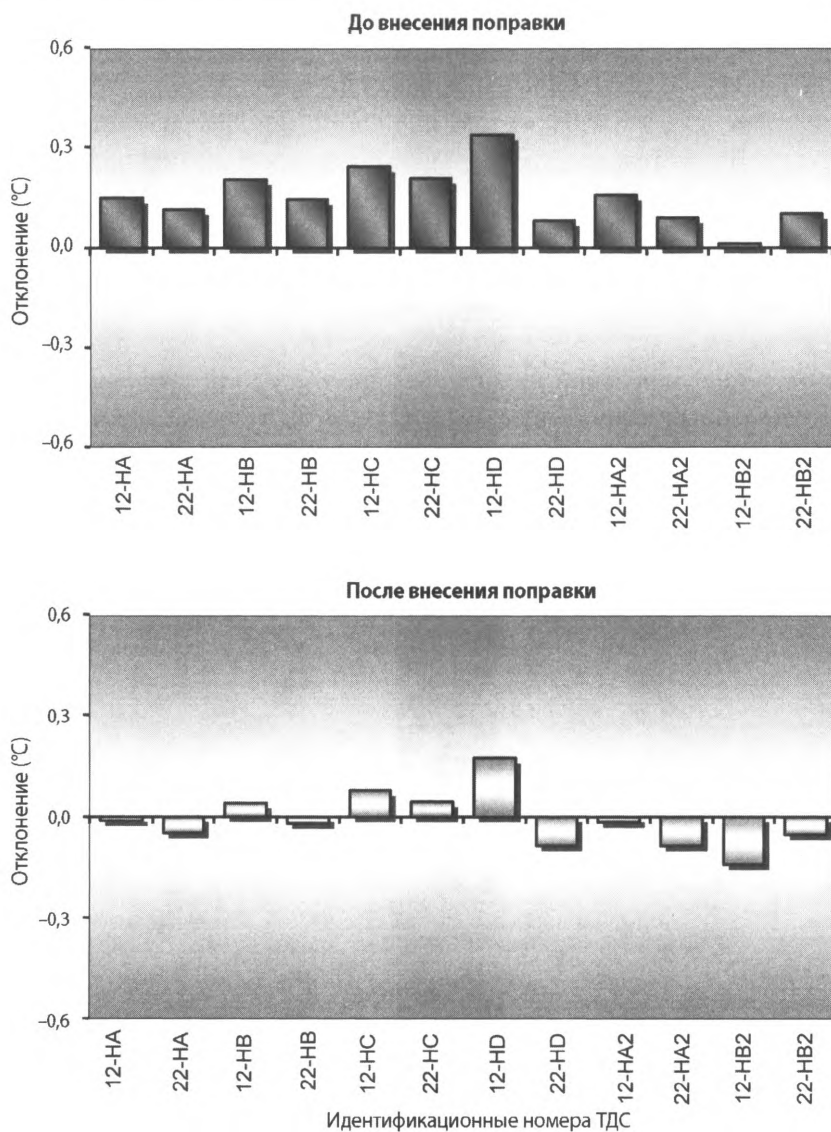


Рис. 5.6. Результаты перекрестной калибровки до и после внесения поправок на нестабильность и неоднородность температуры

калибровки. Степень такого влияния на результаты зависит от конкретной АЭС. В некоторых случаях внесение поправок приводит к значительному различию в результатах, а в других — лишь к небольшому.

На рис. 5.6 представлены результаты перекрестной калибровки для 12 ТДС на АЭС с реактором типа PWR, полученные до и после внесения

поправок на нестабильность и неоднородность температуры рабочей среды на станции. До внесения поправок результаты указывают на наличие положительных отклонений для ТДС, в то время как после корректировки, как и ожидалось, отклонения приобретают случайный характер. Более того, в рассмотренном примере корректировка выразилась в уменьшении абсолютных величин отклонений для ТДС.

5.7. Программное обеспечение для автоматизации перекрестной калибровки

Процедура перекрестной калибровки проста, но требует проведения многочисленных вычислений. В этой связи целесообразно автоматизировать этот процесс, чтобы облегчить выполнение задач по сбору и анализу данных. На рис. 5.7 показаны первичные данные для перекрестной

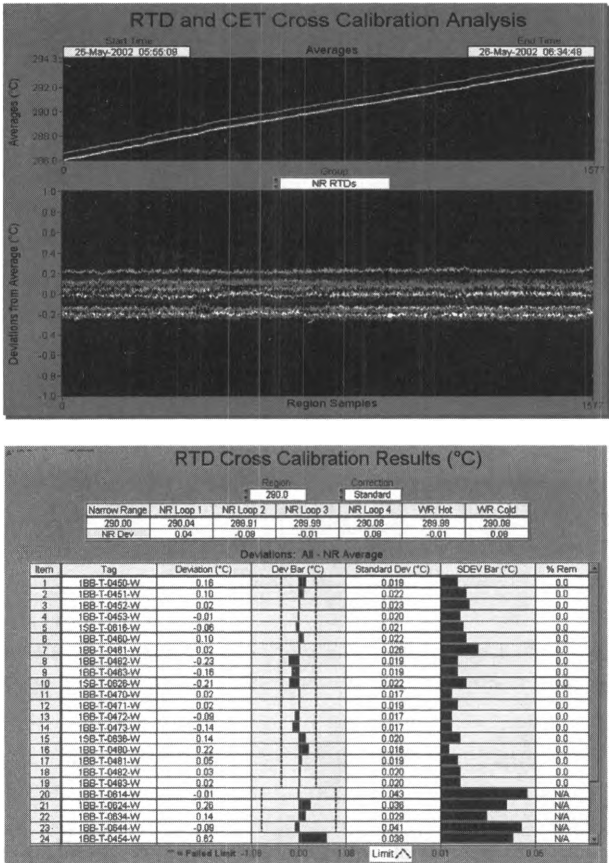


Рис. 5.7. Первичные данные и результаты перекрестной калибровки, полученные при помощи автоматизированного программного обеспечения

калибровки, полученные от стационарного компьютера во время пуска станции. Автоматизированное программное обеспечение позволяет считывать первичные данные и строить их график, выполнять анализ, включая внесение поправок на температурные нестабильность и неоднородность, а также распечатывать получаемые результаты.

5.8. Погрешность результатов перекрестной калибровки

Погрешность, характеризующая результаты тестирования методом перекрестной калибровки, зависит от того, собирают ли данные при помощи специальной системы сбора данных или они получены от стационарного компьютера. Погрешности, связанные с каждым из этих двух способов получения данных, обсуждаются в следующих двух разделах.

5.8.1. Погрешность при использовании специальной системы сбора данных

При использовании специальной системы сбора данных для перекрестной калибровки ТДС возникают погрешности, или ошибки, четырех типов: погрешность, связанная с оборудованием для тестирования, случайная ошибка и ошибки, связанные с нестабильностью и неоднородностью. В таблице 5.6 приводятся оценки типичных значений погрешностей для испытаний ТДС методом перекрестной калибровки при семи различных температурах на АЭС с реактором типа PWR. Эти погрешности были вычислены путем объединения ошибок, вызываемых следующими четырьмя причинами:

- 1. Погрешность, связанная с оборудованием для тестирования.** При использовании специальной системы сбора данных производят измерение сопротивлений и их значения преобразуются в температуру. Таким образом, погрешность результатов зависит от точности и дрейфа оборудования для измерения сопротивления. Обычно точность и краткосрочный дрейф оборудования для измерения сопротивления, производимого в настоящее время, составляют от 0,01 до 0,03 °C по температуре, в зависимости от измеряемых сопротивлений и используемого оборудования.
- 2. Случайная ошибка.** Случайная ошибка определяется при помощи измерений стандартного отклонения выборки измерительного шума. Для определения случайной ошибки обычно подсоединяют постоянное сопротивление, имитирующее ТДС,

Таблица 5.6. Пример типичных погрешностей результатов тестирования группы ТДС методом перекрестной калибровки при семи температурах

Температура (°C)	Ошибки (°C)				Полная ошибка (СКО, °C)
	Оборудование e_1	Случайная ошибка e_2	Нестабильность e_3	Неоднородность e_4	
121	0,011	0,003	0,001	0,001	0,011
149	0,013	0,003	0,003	0,004	0,014
171	0,013	0,003	0,018	0,021	0,031
204	0,013	0,003	0,010	0,014	0,022
232	0,013	0,003	0,021	0,027	0,037
260	0,014	0,003	0,019	0,026	0,035
282	0,014	0,003	0,018	0,021	0,031

к оборудованию сбора данных. Величину этого сопротивления выбирают, исходя из тех температур, при которых производится тестирование методом перекрестной калибровки, и сопротивления испытываемых ТДС.

- Ошибка из-за нестабильности.** Чтобы продемонстрировать тип ошибок из-за нестабильности температуры, встречающихся при перекрестной калибровке ТДС, на рис. 5.8 представлен

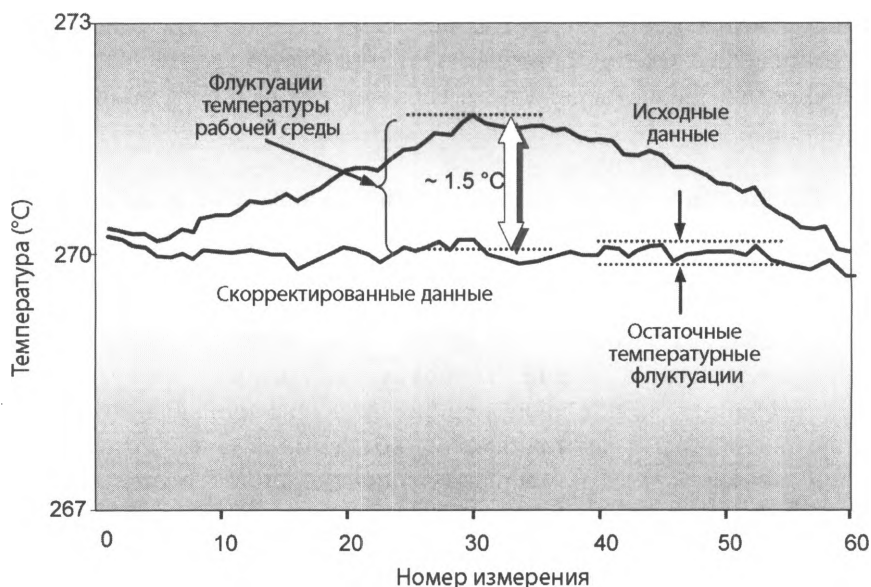


Рис. 5.8. Пример данных перекрестной калибровки до и после внесения поправки на флуктуации температуры рабочей среды

набор данных, полученных при испытаниях этим методом 16 ТДС на станции с реактором типа PWR. Эти данные включают в себя 64 точки измерений, полученные в четырех сериях измерений для 16 ТДС. В исходных данных явно прослеживается непостоянство температуры. На рисунке схематически также показан пример данных, в которые внесена поправка. Скорректированные данные не содержат большого разброса, но в них все же видны некоторые флуктуации. Эти флуктуации называются *остаточными температурными флуктуациями*.

Корректировка на нестабильность в данном примере выполнялась путем подгонки исходных данных к двум отрезкам прямых линий при помощи метода наименьших квадратов. После этого точки на прямых линиях были вычтены из исходных данных, чтобы удалить большие колебания температуры. Подобный подход позволил снизить влияние флуктуаций примерно с $1,5^{\circ}\text{C}$ до $0,15^{\circ}\text{C}$.

Чтобы вычислить ошибку из-за нестабильности температуры, определяют стандартное отклонение остаточных флуктуаций, которые остаются после внесения в данные поправок на: (1) отклонения индивидуальных ТДС, (2) флуктуации и дрейф температуры рабочей среды, и (3) крупные неоднородности между ТДС на горячих и на холодных участках первичных контуров теплоносителя. Для скорректированных данных, представленных на рис. 5.8, ошибка из-за нестабильности (стандартное отклонение остаточных флуктуаций) составляет примерно $0,015^{\circ}\text{C}$.

В таблице 5.7 показаны стандартные отклонения данных перекрестной калибровки для трех температур, как без внесения

Таблица 5.7. Влияние поправки на нестабильность на стандартное отклонение исходных и скорректированных данных перекрестной калибровки

Температура ($^{\circ}\text{C}$)	Прогон №	Стандартное отклонение ($^{\circ}\text{C}$)	
		Исходные данные	Скорректированные данные
280	1	0,10	0,03
	2	0,08	0,03
220	1	0,12	0,02
	2	0,06	0,02
170	1	0,09	0,03
	2	0,11	0,03
Среднее значение		0,09	0,03

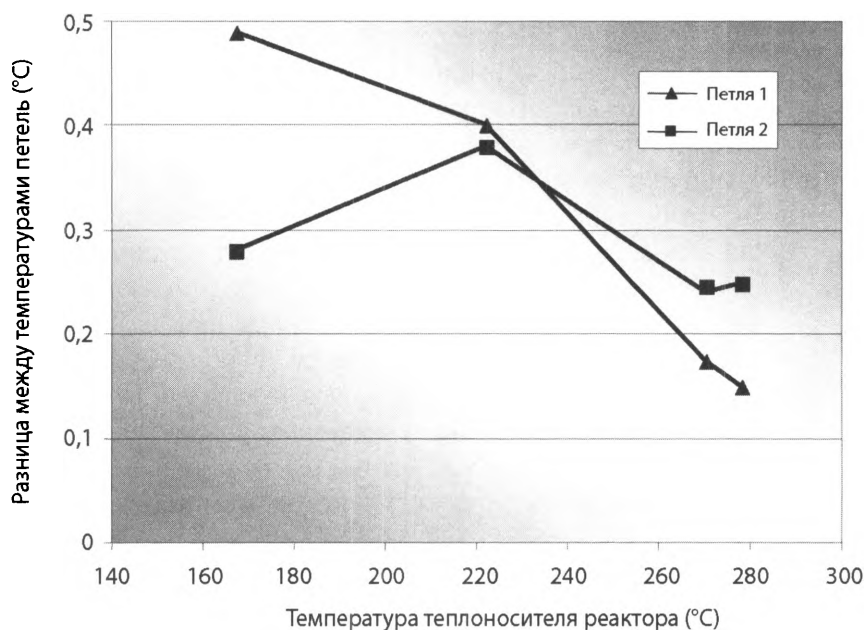


Рис. 5.9. Разница температур между горячим и холодным участками в каждой из двух петель теплоносителя реактора типа PWR

поправок на нестабильность, так и после их внесения. Стандартные отклонения представлены для 64 измерительных точек, относящихся к четырем наборам данных перекрестной калибровки для 16 ТДС. Из таблицы ясно видно, что поправка на нестабильность позволила снизить величину среднего стандартного отклонения в три раза, с 0,09 до 0,03°C. Представленные данные, а также результаты других подобных измерений свидетельствуют о том, что типичные погрешности результатов перекрестной калибровки, вызываемые нестабильностью температуры рабочей среды, находятся в диапазоне от 0,001 до 0,1°C.

4. **Ошибка из-за неоднородности.** Неполное перемешивание теплоносителя и различия в условиях теплосъема в различных петлях могут приводить к тому, что в изотермических условиях между горячими и холодными участками петель первого контура может наблюдаться разность температур теплоносителя, достигающая 0,5°C. На рис. 5.9 для четырех значений температуры показаны различия между средней температурой горячих и холодных участков двух петель АЭС с реактором типа PWR. Подобные различия называют *ошибкой из-за неоднородности*. Эту ошибку

следует определять и вычитать из полученных данных, чтобы повысить точность результатов перекрестной калибровки.

Ошибки из-за неоднородности определяются для каждой температуры измерением как стандартных отклонений ТДС в каждой петле, так и стандартных отклонений ТДС горячего и холодного участков, с последующим выбором наибольшего значения.

Полная ошибка для каждой температуры вычисляется по формуле вычисления среднеквадратичной ошибки (СКО):

$$\text{СКО} = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2} \quad (5.4)$$

где e_1 , e_2 , e_3 и e_4 есть описанные выше четыре ошибки.

Результаты такого расчета приведены в таблице 5.6, они находятся в диапазоне от 0,01°C до 0,03°C. Эти значения характеризуют ширину диапазона погрешности, которую следует указывать вместе с результатами определения отклонений, найденных при испытаниях датчиков методом перекрестной калибровки. Другими словами, результаты перекрестной калибровки, включая их погрешность, могут быть выражены в виде $|\Delta| \pm \text{СКО}$, где СКО есть полная ошибка, рассчитанная по формуле 5.4, а $|\Delta|$ является отклонением, найденным при тестировании методом перекрестной калибровки.

В колонке «Полная ошибка» дана ширина диапазона погрешности. Величину этого диапазона следует указывать вместе с результатами определения отклонений для ТДС ($|\Delta| \pm \text{СКО}$)

5.8.2. Погрешности при использовании данных из стационарного компьютера

Когда отбор данных производится из стационарного компьютера или базы данных технологических параметров, то при расчете погрешности результатов перекрестной калибровки необходимо рассмотреть еще несколько источников ошибок в добавление к ошибкам, рассмотренным в предыдущем разделе. Например, на АЭС сопротивление ТДС часто преобразуется в напряжение при помощи измерительного устройства, которое обычно включает в себя мост Уитстона или другой, ему аналогичный. Эти устройства калибруются так, чтобы напряжение на выходе было пропорционально температуре, измеряемой ТДС. На рис. 5.10 показана блок-схема элементов канала измерения температуры, для анализа методом перекрестной калибровки.

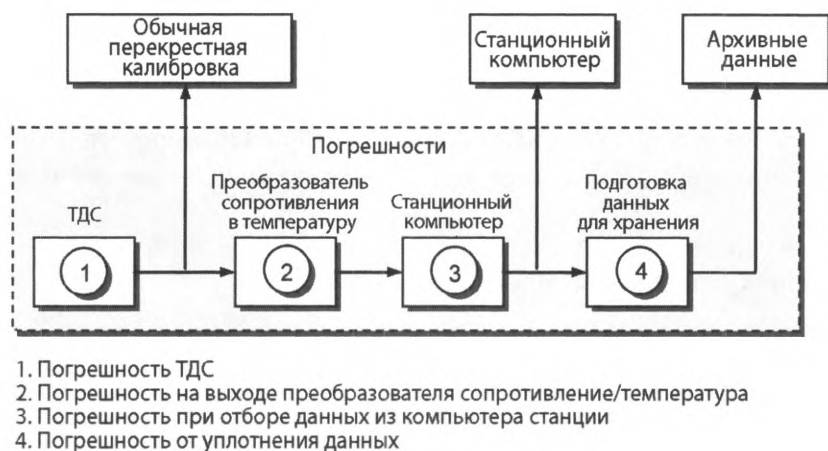


Рис. 5.10 Пример канала измерения температуры и связанных с ним источников погрешностей, которые могут возникнуть при использовании данных стационарного компьютера для перекрестной калибровки

При калибровке измерительных устройств возникает ошибка, которую необходимо учесть при вычислении погрешности результатов перекрестной калибровки. Помимо этого, измерительные устройства обычно выполняют линейное преобразование величины сопротивления в температуру. Использование линейной зависимости приводит к возникновению еще одной ошибки в выходном сигнале преобразователя, потому что калибровочная кривая ТДС на самом деле не линейна, а описывается квадратичной функцией. На рис. 5.11 показана получающаяся ошибка в виде зависимости от температуры для ТДС узкого диапазона; данную ошибку называют *погрешностью перехода от сопротивления к температуре*, или *R-T погрешностью* (см. п. 2 на рис. 5.10).

При использовании данных стационарного компьютера для перекрестной калибровки необходимо учесть также погрешность дискретизации, возникающую при преобразовании аналоговых сигналов с датчиков технологических процессов в цифровую форму (см. п. 3 на рис. 5.10). Архивизация данных также влияет на погрешность. Архиваторы типа PIC® или eDNA® сжимают данные, уменьшая объем памяти. При этом сохраняются только те данные, которые отличаются от предыдущих на определенную величину (например, не менее чем на 0,1°C). Эту ошибку уплотнения также необходимо учитывать при определении погрешности использования данных стационарного компьютера для перекрестной калибровки (см. п. 4 на рис. 5.10).

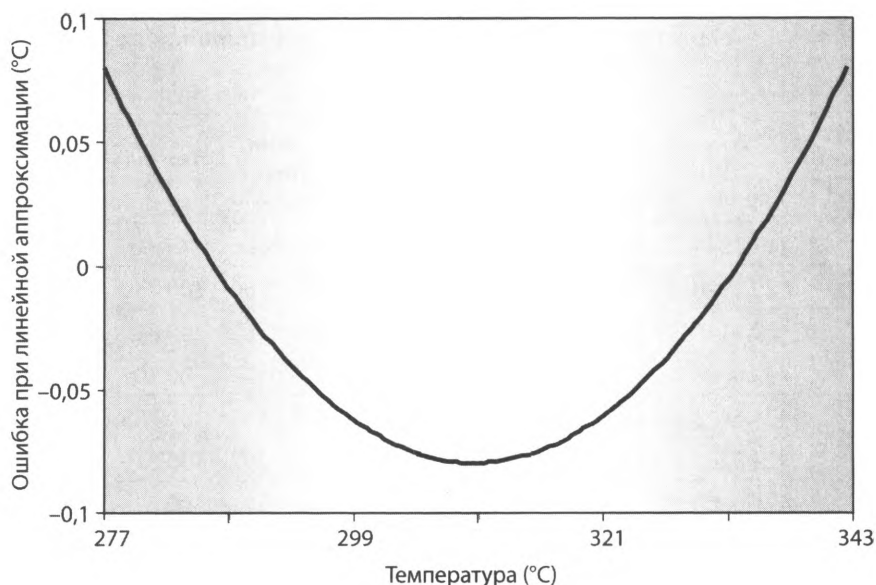


Рис. 5.11. Ошибка между линейной и квадратичной аппроксимациями в узком диапазоне температур

5.9. Подтверждение применимости метода перекрестной калибровки

Применимость метода перекрестной калибровки подтверждена как для ТДС, так и для термопар в лабораторных условиях с использованием масляного термостата, СПТС и комплекта оборудования для тестирования по методу перекрестной калибровки [7]. Целью работы являлась демонстрация того, что «истинная» температура масляного термостата, как она была измерена СПТС, была близка средней температуре, определенной группой ТДС или термопар. Обобщенные результаты работ, подтверждающие применимость метода представлены в таблице 5.8 для ТДС и таблице 5.9 для термопар.

Из таблицы 5.8 ясно, что средняя температура в термостате, определяемая 18 ТДС (за исключением одного выброса), равна $300,786^{\circ}\text{C}$, что близко к истинной температуре, определяемой двумя СПТС: одним – $300,788^{\circ}\text{C}$, а другим – $300,762^{\circ}\text{C}$. Очень хорошее согласие между данными измерений наблюдается также в случае термопар, что видно из таблицы 5.9. Действительно, средняя температура, показываемая термопарами, составляет $200,33^{\circ}\text{C}$ в сравнении с «истинной» температурой термостата, равной $200,38^{\circ}\text{C}$ в соответствии с измерениями СПТС.

Таблица 5.8. Результаты лабораторной проверки применимости метода перекрестной калибровки для четырехпроводных ТДС

<i>Температура масла: 300 °C</i>							
Идент. № ТДС	Измерения сопротивления (Ом)				Средн. сопр. (Ом)	Тем-ра (°C)	Откло- нение (°C)
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4			
21	212,2644	212,2643	212,2741	212,2634	212,2666	*303,537	#2,751
19	429,4928	429,4910	429,5060	429,4940	429,4960	300,759	-0,028
12A	429,1156	429,1152	429,1298	429,1134	429,1185	300,811	0,025
12C	429,0084	429,0088	429,0224	429,0102	429,0125	300,807	0,021
03	424,6416	424,6324	424,6384	424,6494	424,6405	300,785	-0,001
18	429,8286	429,8200	429,8228	429,8394	429,8277	300,819	0,033
15A	424,6800	424,6818	424,6862	424,6988	424,6867	300,774	-0,012
15C	424,2652	424,2698	424,2740	424,2818	424,2727	300,774	-0,012
13A	428,9974	428,9962	429,0018	429,0144	429,0025	300,762	-0,024
13C	428,9734	428,9702	428,9726	428,9840	428,9751	300,771	-0,015
9C	430,2376	430,2382	430,2478	430,2404	430,2410	300,787	0,001
9A	430,1488	430,1532	430,1658	430,1480	430,1540	300,780	-0,006
17A	424,3216	424,3148	424,3264	424,3152	424,3195	300,840	0,054
17C	424,2266	424,2230	424,2322	424,2186	424,2251	300,833	0,047
16A	424,7866	424,7882	424,7912	424,7800	424,7865	300,806	0,020
16C	424,5208	424,5294	424,5258	424,5228	424,5247	300,806	0,020
07	430,0636	430,0732	430,0620	430,0628	430,0654	300,724	-0,062
20	430,3424	430,3492	430,3344	430,3448	430,3427	300,749	-0,037
СПТС-1	54,7764	54,7778	54,7761	54,7767	54,7768	300,788	0,002
СПТС-2	54,7930	54,7954	54,7930	54,7935	54,7937	300,762	-0,024
Средняя температура: 300,786 °							

* Не использован при расчете среднего значения.

Допустимый предел отклонения превышен.

Результаты, представленные в таблице 5.8, относятся к четырехпроводным ТДС. Такая же работа по проверке применимости метода была выполнена для тех же ТДС, установленных по трехпроводной схеме. Результаты работы обсуждаются ниже в разделе 5.10 в отношении погрешностей, которые могут касаться трехпроводных ТДС.

Таблица 5.9. Результаты лабораторной проверки применимости метода перекрестной калибровки для термопар

Идент. №дат-чика	Тип	ЭДС (мВ)					Тем-ра (°C)	ΔТ (°C)
		Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4	Усредн.		
1	К	8,103	8,103	8,103	8,103	8,103	199,16	-1,17
2	К	8,116	8,115	8,115	8,115	8,115	199,46	-0,87
3	К	8,201	8,201	8,201	8,201	8,201	201,61	1,28
4	К	8,123	8,124	8,130	8,125	8,126	199,74	-0,59
5	Е	13,471	13,471	13,471	13,470	13,471	200,71	0,38
6	Е	13,500	13,500	13,499	13,499	13,500	201,10	0,77
7	Е	13,513	13,514	13,510	13,512	13,512	201,26	0,93
8	Е	13,433	13,442	13,430	13,420	13,431	200,17	-0,16
9	Ј	10,755	10,758	10,757	10,757	10,758	199,67	-0,66
10	Ј	10,831	10,834	10,834	10,833	10,834	201,04	0,71
11	Ј	10,725	10,725	10,725	10,725	10,725	199,07	-1,26
12	Ј	10,830	10,829	10,830	10,829	10,830	200,96	0,63
СПРТ	—	*45,334	*45,334	*45,334	*45,334	*45,334	#200,38	0,05
Средняя температура: 200,33 °C								

* Сопротивление (Ом).

#Не использован при расчете среднего значения.

5.10. Погрешности при перекрестной калибровке трехпроводных ТДС

Погрешности, которые были рассмотрены в разделе 5.8, не включали в себя ошибки, вызываемые дисбалансом соединительных проводов трехпроводных ТДС. Эта ошибка возникает из-за разницы в сопротивлениях проводов, которыми чувствительный элемент соединяется с оборудованием для измерения сопротивления. На рис. 5.12 показаны трехпроводная и четырехпроводная схемы соединений. В четырехпроводной схеме сопротивления соединительных проводов полностью скомпенсированы, в то время как в трехпроводной схеме сопротивление провода 3 (R_3) должно быть равно сопротивлению провода 1 (R_1) или провода 2 (R_2), в зависимости от того, какой провод используется в качестве общего провода в трехпроводной схеме. Если сопротивление провода 3 (R_3) не равно сопротивлению одного из двух других проводов, то при измерении температуры трехпроводным ТДС появляется

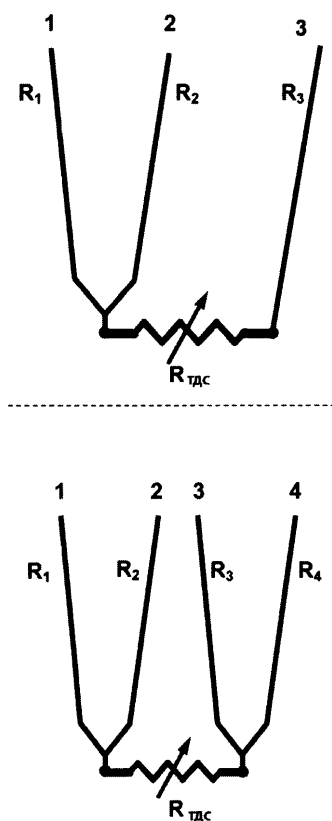


Рис. 5.12. Трех- и четырехпроводные конфигурации ТДС

ошибка, которую называют *ошибкой дисбаланса соединительных проводов*. Как будет показано ниже, дисбаланс соединительных проводов может привести к ошибке, в среднем, порядка $0,10^\circ\text{C}$ при температуре примерно 300°C .

5.10.1. Процедура перекрестной калибровки для трехпроводных ТДС

Процедура перекрестной калибровки для трехпроводных ТДС должна включать в себя три отдельных измерения сопротивления по четырехпроводной схеме для того, чтобы получить сопротивление каждой ТДС, которая тестируется методом перекрестной калибровки:

$$\text{Измерение 1: } R_{13} = R_1 + R_{\text{ТДС}} + R_3 \quad (5.5)$$

$$\text{Измерение 2: } R_{23} = R_2 + R_{\text{ТДС}} + R_3 \quad (5.6)$$

$$\text{Измерение 3: } R_{12} = R_1 + R_2 \quad (5.7)$$

Для получения точных результатов перекрестной калибровки необходимо, чтобы выполнялось следующее:

$$R_1 = \frac{R_2 + R_3}{2} \quad (5.8)$$

Если это выполняется, то:

$$R_{\text{ТДС}} = \frac{\text{Измерение 1} + \text{Измерение 2}}{2} - \text{Измерение 3} \quad (5.9)$$

Сопротивление провода 3 не может быть измерено без демонтажа датчика во время тестирования методом перекрестной калибровки, поэтому невозможно определить точное влияние дисбаланса соединительных проводов на результаты перекрестной калибровки. Можно лишь определить величины R_1 и R_2 и использовать разницу между этими величинами для оценки погрешностей, вызываемых дисбалансом соединительных проводов. Это было сделано для комплекта испытаний методом перекрестной калибровки, выполненных для 16 ТДС на АЭС с реактором типа PWR. Результаты представлены в таблице 5.10. Среднее различие между R_1 и R_2 для этого примера составляет примерно

Таблица 5.10. Дисбаланс соединительных проводов, измеренный при постоянной температуре 280°C

Идент. № ТДС	Сопротивление (Ом)		
	R_1	R_2	$\Delta R = (R_1 - R_2)$
1	2,228	2,476	0,248
2	2,968	2,955	0,013
3	2,257	2,303	0,047
4	2,310	2,417	0,108
5	2,302	2,311	0,009
6	2,239	2,284	0,045
7	2,916	3,018	0,102
8	2,243	2,251	0,008
9	2,567	2,671	0,095
10	2,530	2,540	0,010
11	2,304	2,373	0,069
12	2,088	2,072	0,016
13	2,552	2,662	0,070
14	2,248	2,218	0,030
15	2,697	2,636	0,061
16	2,336	2,098	0,238
Среднее значение ΔR (Ом):			0,073
Ошибка в температуре для ТДС с сопротивлением 200 Ом:			0,091°C

0,07 Ом, что соответствует погрешности в значении температуры, равной примерно 0,09°C для ТДС с сопротивлением в 200 Ом.

Следует отметить, что ошибка из-за дисбаланса соединительных проводов может представлять собой проблему для четырехпроводных ТДС, в которых имеется холостая петля (см. Главу 4, рис. 4.9).

5.10.2. Проверка применимости метода перекрестной калибровки для трехпроводных ТДС

Полная ошибка перекрестной калибровки для трехпроводных ТДС включает те же компоненты, что представлены в таблице 5.6, не включая, однако, погрешности, связанные с дисбалансом соединительных проводов. Для проверки применимости метода перекрестной калибровки для трехпроводных ТДС в лабораторных условиях выполнено тестирование тех же 18 ТДС, что включены в таблицу 5.8. При этом четырехпроводные ТДС испытывались с трехпроводной схемой соединений.

Результаты проверки метода перекрестной калибровки на применимость для четырехпроводной схемы использования датчиков представлены в таблице 5.8, а результаты для трехпроводной схемы приведены в таблице 5.11. Очевидно, что отклонения для трехпроводной схемы превышают отклонения для четырехпроводной. Обычно этого можно ожидать из-за влияния дисбаланса соединительных проводов на перекрестную калибровку трехпроводных ТДС.

5.11. Проверка применимости динамической перекрестной калибровки

Данные для перекрестной калибровки могут быть получены в условиях поддержания температуры на постоянном уровне или когда температура рабочей среды линейно изменяется во время пуска или останова станции. Если данные получают в условиях линейного изменения температуры, такое тестирование называют *динамической перекрестной калибровкой* [8, 9].

При проведении динамической перекрестной калибровки датчики сканируют от первого до последнего, затем от последнего до первого, и результаты осредняют. Если динамическая перекрестная калибровка выполнена правильно, результаты должны получиться сравнимыми с результатами, получаемыми при сборе данных в условиях поддержания постоянной температуры, что было проверено как в лабораторных условиях, так и на АЭС. Результаты проверок представлены в таблицах 5.12 и 5.13. В лабораторных испытаниях температура рабочей среды изменялась линейно с 300°C до комнатной температуры со скоростью примерно 60°C/час.

Результаты этих исследований показали, что: (1) типичные результаты тестирования при линейном изменении температуры согласуются с точностью примерно 0,03 °C с результатами, полученными в условиях поддержания постоянной температуры, и (2) различия между этими результатами находятся в пределах воспроизводимости и погрешности метода перекрестной калибровки. Опыт тестирования в условиях станций показал, что температура рабочей среды обычно более стабильна и однородна во время режимов ее линейного изменения, чем когда операторы АЭС пытаются ее поддерживать на постоянном уровне.

Таблица 5.11. Результаты лабораторной проверки применимости метода перекрестной калибровки трехпроводных ТДС

Температура масла: 300 °С							
Идент. №	Измерения сопротивления (Ом)				Средн. сопр. (Ом)	Тем-ра (°С)	Отклонение (°С)
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4			
21	212,2397	212,2376	212,2349	212,2344	212,2366	*303,452	#2,908
19	429,3999	429,4064	429,3937	429,3864	429,3966	300,622	0,078
12A	428,8234	428,8349	428,8227	428,8128	428,8234	300,403	-0,141
12C	428,7745	428,7909	428,7758	428,7656	428,7767	300,481	-0,063
03	424,7646	424,7887	424,7765	424,7661	424,7740	*300,973	#0,429
18	429,6882	429,7120	429,7032	429,6962	429,6999	300,643	0,099
15A	424,5699	424,5908	424,5827	424,5752	424,5797	300,623	0,079
15C	424,1568	424,1741	424,1683	424,1659	424,1663	300,625	0,081
13A	428,7102	428,7284	428,7178	428,7214	428,7195	300,371	#-0,173
13C	428,6318	428,6460	428,6365	428,6451	428,6399	300,308	#-0,236
9C	430,0284	430,0315	430,0301	430,0450	430,0338	300,500	-0,044
9A	429,9458	429,9449	429,9430	429,9646	429,9496	300,497	-0,047
17A	424,1572	424,1518	424,1428	424,1502	424,1505	300,602	0,059
17C	424,0595	424,0545	424,0462	424,0589	424,0548	300,593	0,049
16A	424,6559	424,6485	424,6553	424,6712	424,6577	300,625	0,081
16C	424,3978	424,3937	424,4001	424,4085	424,4000	300,631	0,087
07	429,8613	429,8435	429,8580	429,8836	429,8616	300,445	-0,099
20	430,2722	430,2506	430,2682	430,2763	430,2668	300,645	0,101
СПТС-1	54,7627	54,7614	54,7617	54,7634	54,7623	300,632	0,088
СПТС-2	54,8013	54,7996	54,8012	54,8046	54,8017	*300,848	#0,304

Средняя температура: 300,544 °С

* Не использован при расчете среднего значения

Допустимый предел отклонения превышен

Таблица 5.12. Результаты лабораторной проверки применимости динамической перекрестной калибровки

Температура масла: 300 °С							
Идент. №	Измерения сопротивления (Ом)				Средн. сопр. (Ом)	Тем-ра (°С)	Отклонение (°С)
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4			
21	212,1559	209,3864	209,3155	206,6431	209,3752	*295,338	#2,631
19	429,1486	423,7962	423,3428	418,2018	423,6224	292,681	-0,026
12A	428,7144	423,6962	422,9530	418,1374	423,3752	292,885	#0,177
12C	428,4792	423,7342	422,7188	418,1828	423,2788	292,892	#0,184
03	423,8728	419,4584	418,1750	413,9560	418,8656	292,686	-0,022
18	428,8116	424,5744	422,9724	418,9354	423,8235	292,575	-0,132
15A	423,7890	419,9490	418,1166	414,4610	419,0789	292,900	#0,193
15C	423,2386	419,6854	417,5794	414,1920	418,6739	292,905	#0,197
13A	427,7112	424,3816	421,9590	418,7786	423,2076	292,766	0,058
13C	427,5354	424,4894	421,7880	418,8812	423,1735	292,765	0,057
9C	428,5696	425,8194	422,8422	420,2084	424,3599	292,664	-0,043
9A	428,3434	425,8806	422,6212	420,2622	424,2769	292,663	-0,045
17A	422,3640	420,2154	416,7224	414,6750	418,4942	292,655	,0,052
17C	422,1288	420,2594	416,5016	414,7212	418,4028	292,646	-0,061
16A	422,5072	420,9188	416,8842	415,3698	418,9200	292,567	-0,141
16C	422,1058	420,8016	416,4910	415,2438	418,6606	292,565	-0,143
07	427,4872	426,4386	421,6986	420,6922	424,0792	292,526	#-0,182
20	427,6642	426,9180	421,9240	421,1984	424,4262	292,617	-0,090
СПРТ-1	54,4276	54,3723	53,6961	53,6425	54,0346	292,793	0,085
СПРТ-2	54,4188	54,4000	53,6885	53,6699	54,0443	292,692	-0,016

Средняя температура: 292,707 °С

*Не использован при расчете среднего значения

#Допустимый предел отклонения превышен

Таблица 5.13. Результаты проверки применимости метода динамической перекрестной калибровки в условиях АЭС

Идент. № ТДС	Результаты	
	при постоянной тем-ре (°C)	при линейном изменении (°C)
2NCRD5420	–0,03	–0,03
2NCRD5421	–0,06	–0,06
2NCRD5422	0,08	0,09
2NCRD5430	0,01	0,00
2NCRD5440	0,01	0,00
2NCRD5460	0,04	0,00
2NCRD5461	0,13	0,12
2NCRD5462	–0,01	–0,04
2NCRD5470	–0,10	–0,06
2NCRD5480	–0,06	–0,02
2NCRD5500	0,01	–0,02
2NCRD5501	–0,01	–0,03
2NCRD5502	–0,01	–0,03
2NCRD5510	0,06	0,10
2NCRD5520	–0,05	–0,01
2NCRD5540	–0,10	–0,07
2NCRD5542	–0,07	–0,05
2NCRD5550	0,05	0,02
2NCRD5560	0,02	–0,03

Результаты в обоих столбцах таблицы основаны на данных, полученных на АЭС с реактором типа PWR при температуре около 300°C.

5.12. Перекрестная калибровка термопар на выходе из активной зоны

Когда на АЭС с реакторами типа PWR поддерживается изотермический режим, ТДС первого контура и термопары на выходе из зоны практически находятся при одинаковой температуре. По этой причине эти термопары тестируются методом перекрестной калибровки с использованием показаний ТДС первого контура, потому что последние обычно имеют более высокую точность, чем термопары.

Для проведения перекрестной калибровки термопар надо из средней температуры, показываемой группой ТДС узкого диапазона, вычесть

Таблица 5.14. Результаты перекрестной калибровки термопар

№	Идентификатор	Отклонение	Гистограмма отклонений
1	1BB-T-0325-W(H15)	5,33	
2	1BB-T-0331-W(J12)	0,47	
3	1BB-T-0337-W(L10)	-0,53	
4	1BB-T-0338-W(L12)	1,02	
5	1BB-T-0339-W(L14)	-1,25	
6	1BB-T-0346-W(N14)	2,12	
7	1BB-T-0349-W(R10)	3,58	
8	1BB-T-0326-W(J2)	-0,71	
9	1BB-T-0327-W(J4)	2,04	
10	1BB-T-0329-W(J8)	2,83	
11	1BB-T-0334-W(L4)	-0,65	
12	1BB-T-0335-W(L6)	2,42	
13	1BB-T-0340-W(N2)	0,91	
14	1BB-T-0343-W(N8)	3,19	
15	1BB-T-0347-W(R6)	3,02	
16	1BB-T-0348-W(R8)	1,70	
17	1BB-T-0300-W(A6)	1,68	
18	1BB-T-0303-W(C2)	0,97	
19	1BB-T-0304-W(C4)	0,37	
20	1BB-T-0310-W(E2)	0,45	
21	1BB-T-0311-W(E4)	4,28	
22	1BB-T-0317-W(G2)	3,45	
23	1BB-T-0318-W(G4)	-0,85	
24	1BB-T-0301-W(A8)	5,87	
25	1BB-T-0302-W(A10)	0,65	
26	1BB-T-0306-W(C8)	-0,19	
27	1BB-T-0308-W(C12)	2,75	
28	1BB-T-0313-W(E8)	1,35	

показания каждой термопары и затем представить результаты в виде, соответствующем таблице 5.14. Данные для этой таблицы были получены из станционного компьютера, а анализ был выполнен с помощью программного обеспечения для автоматизации перекрестной калибровки.

5.13. Повторная калибровка датчиков-выбросов

Если данные для перекрестной калибровки были собраны во время пуска или останова станции и относятся к трем или более значениям температуры, расположенным достаточно далеко друг от друга, то для любого ТДС, признанного выбросом, можно создать новую калибровочную таблицу, используя процедуру, описываемую в этом разделе.

5.13.1. Повторная калибровка

ТДС, признанный выбросом, можно перекалибровать для того, чтобы избежать его преждевременной замены, если выполняются следующие условия:

- выявлено только небольшое число выбросов.
- новая калибровочная таблица создается для ТДС один раз или в крайнем случае два.

При выполнении этих условий повторную калибровку датчика-выброса можно провести, используя следующую процедуру:

1. Приготовить таблицу с двумя столбцами. Первый столбец предназначен для записи температур, при которых проводилась перекрестная калибровка: каждая температура должна представлять лучшую оценку температуры рабочей среды на основании расчета среднего значения показаний ТДС узкого диапазона. Второй столбец предназначен для записи величин сопротивления ТДС-выброса: чтобы получить значения сопротивлений при проведении перекрестной калибровки с использованием данных из станционного компьютера, надо прибавить отклонения температуры, показываемой этим ТДС, от средней температуры и подставить результат в уравнение Кэллендера или квадратное уравнение, использующее константы, взятые из существующей калибровочной функции ТДС. Затем из уравнения найти соответствующее значение сопротивления.
2. Осуществить подбор данных зависимости сопротивления от температуры к уравнению Кэллендера или квадратному уравнению.
3. Определить константы в уравнении Кэллендера или в квадратном уравнении.
4. Использовать уравнение Кэллендера или квадратное уравнение с новыми константами для создания новой калибровочной таблицы для ТДС-выброса.

Уравнение Кэллендера было задано уравнением 5.1 (разделе 5.3.1), а квадратное уравнение, которое можно использовать для создания новой калибровочной таблицы, имеет следующий вид:

$$R(T) = R_0 (1 + AT + B T^2) \quad (5.10)$$

где:

$R(T)$ – сопротивление при температуре T (Ом)

T – температура в °C

R_0 , A и B являются калибровочными константами ТДС.

Вообще говоря, создание новой калибровочной таблицы для ТДС–выброса аналогично проведению калибровки без реперной точки, соответствующей температуре плавления льда. Влияние калибровки без точки плавления льда на точность калибровки изучалось в лабораторных условиях, используя ТДС ядерного класса [7]. В проведенных исследованиях проводилась калибровка шести ТДС по четырем точкам: 0°C, 100°C, 200°C и 300°C, и данные анализировались с учетом и без учета точки плавления льда. Результаты представлены в таблице 5.15 в виде различных калибровок для температур 0°C, 200°C, 280°C и 300°C.

Как и ожидалось, различия велики при 0°C и малы при более высоких температурах. Такой результат был дополнительно проверен путем повторения калибровок для 12 калибровочных точек в диапазоне от 0°C до 300°C. Полученные данные обрабатывались, используя четыре обычные калибровочные точки (0°C, 100°C, 200°C и 300°C) и четыре калибровочные точки высокой температуры (160°C, 200°C, 240°C и 300°C). Различия полученных калибровок представлены в таблице 5.16 для четырех значений температуры (0°C, 200°C, 280°C и 300°C). И в этом случае различия невелики при высоких температурах и велики при 0°C.

Таблица 5.15. Ошибки калибровки из-за отсутствия точки плавления льда при проведении калибровки

Идентиф. № ТДС	Разница (°C) при указанной температуре			
	0 °C	200 °C	280 °C	300 °C
15A	0,09	0,013	0,002	0,006
15C	0,09	0,013	0,002	0,005
16A	0,09	0,014	0,003	0,004
16C	0,07	0,011	0,002	0,004
17A	0,08	0,013	0,002	0,005
17C	0,09	0,016	0,004	0,005

Приведена разница между точками калибровочных кривых, подобранных при выполнении калибровки с точкой плавления льда и без нее.

Таблица 5.16. Ошибки калибровки из-за отсутствия точки плавления льда при проведении калибровки по 12 точкам

Идентиф. № ТДС	Разница (°C) при указанной температуре			
	0°C	200°C	280°C	300°C
Калибровочные точки 300 °C, 260 °C, 200 °C				
15A	0,099	0,018	0,004	0,006
15C	0,072	0,017	0,003	0,006
16A	0,112	0,015	0,004	0,005
16C	0,121	0,013	0,004	0,004
17A	0,065	0,014	0,002	0,005
17C	0,129	0,040	0,004	0,005
Калибровочные точки 300°C, 260°C, 200°C, 160°C				
15A	0,117	0,017	0,004	0,006
15C	0,109	0,016	0,003	0,006
16A	0,110	0,015	0,004	0,005
16C	0,107	0,013	0,004	0,004
17A	0,065	0,014	0,002	0,005
17C	0,071	0,016	0,004	0,004

Указана разница между точками калибровочных кривых, подобранных при выполнении калибровки с точкой плавления льда и без нее.

5.13.2. Новая калибровочная таблица

После завершения повторной калибровки с использованием процедуры, описанной в разделе 5.13.1, создается новая калибровочная таблица, используемая для внесения поправок в показания стационарных приборов, чтобы согласовать показания ТДС–выброса с другими взаимодублируемыми ТДС на АЭС. Калибровочные константы могут быть вычислены, как показано на рис. 5.13, в этом случае для получения результатов использовалось квадратное уравнение.

На рис. 5.13 показаны данные, использовавшиеся для создания новой калибровочной таблицы для датчика–выброса, константы квадратного уравнения и кривая, показывающая различие между старой калибровкой ТДС–выброса и его новой калибровкой.

5.13.3. Погрешность результатов повторной калибровки

Озабоченность при повторной калибровке датчика–выброса вызывает то, что вновь создаваемая калибровочная кривая может экстраполироваться на значения температур, превышающие крайнюю температуру, при которой проводилась перекрестная калибровка. Например, когда данные для ТДС узкого диапазона отбираются из стационарного

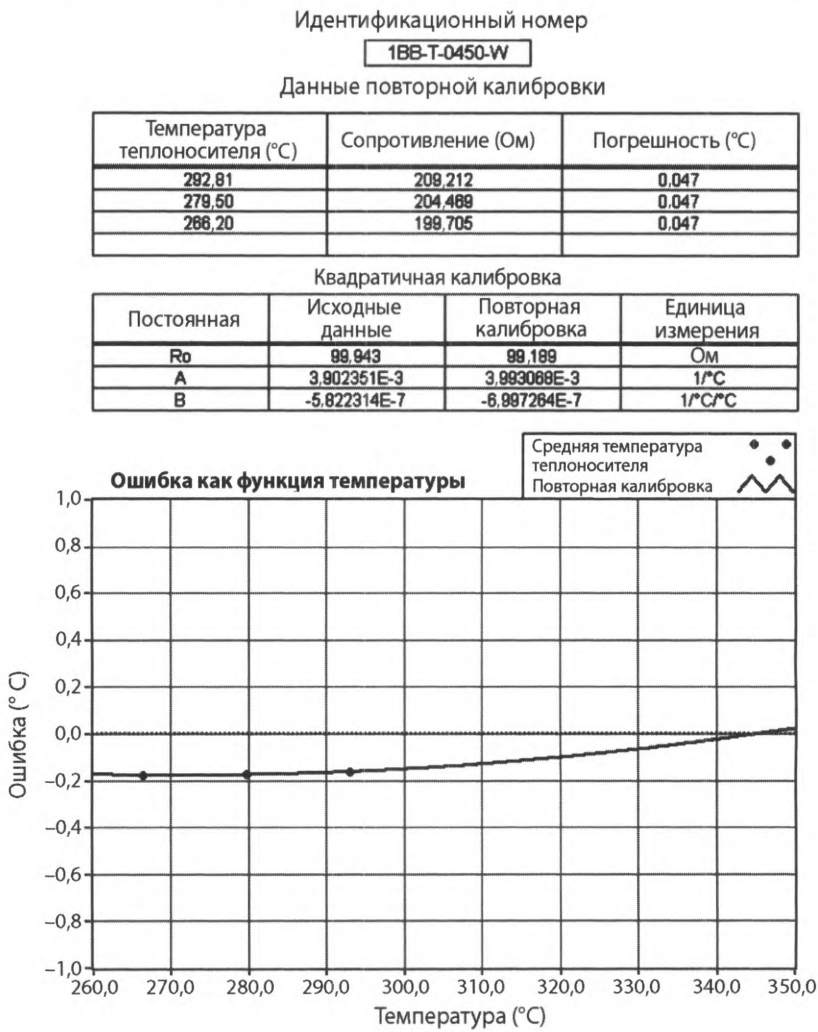


Рис. 5.13. Результаты повторной калибровки датчика–выброса, полученные при помощи автоматизированного программного обеспечения

компьютера, для перекрестной калибровки могут быть выбраны три точки: 270°C, 280°C и 290°C. Из-за такого узкого температурного диапазона погрешности новой калибровочной кривой, созданной для датчика–выброса, могут быть велики, особенно для температур существенно выше, чем 290°C или ниже, чем 270°C. На рис. 5.14 показано, как возможные ошибки экстраполяции при высоких температурах могут увеличиваться в зависимости от того, как комбинировать ошибки при трех температурах для вычисления погрешности экстраполяции. Представленные данные получены при подборе экстраполированной калибровочной кривой, используя квадратное уравнение или уравнение

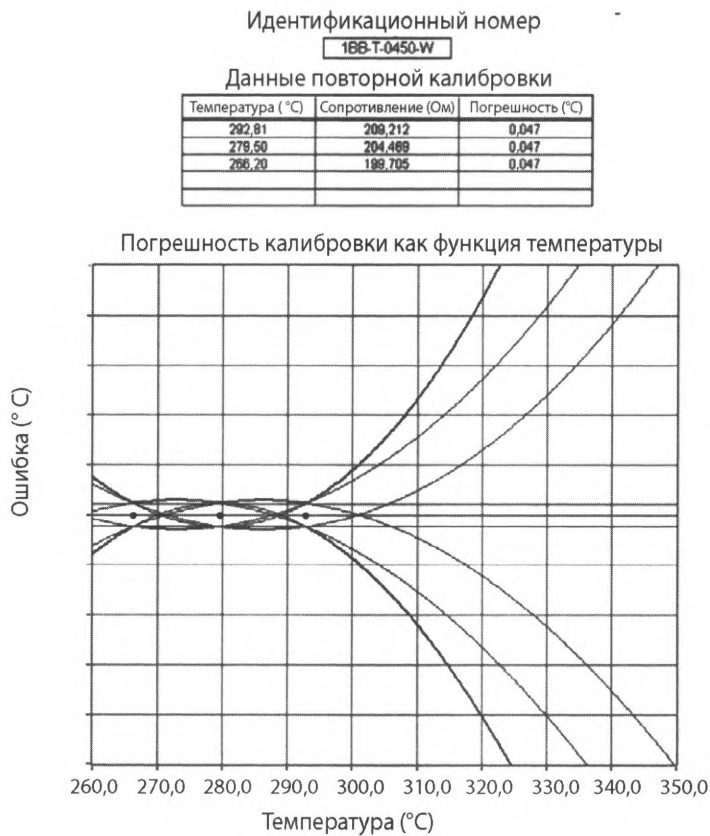


Рис. 5.14. Ошибки экстраполяции при использовании уравнения Кэллендера или квадратного уравнения

Кэллендера. Если подбор производится с использованием линейной функции, то, как видно из рис. 5.15, погрешности экстраполяции значительно уменьшаются.

Ошибка экстраполяции для погрешности, равной 0,05°C для каждой из трех калибровочных точек, может быть рассчитана следующим образом. Если калибровочные точки определены как $270 \pm 0,05^\circ\text{C}$, $280 \pm 0,05^\circ\text{C}$ и $290 \pm 0,05^\circ\text{C}$, то все возможные комбинации крайних значений температуры указаны в таблице 5.17. Для каждой из этих комбинаций рассчитываются новые коэффициенты калибровочной функции, учитывая тип уравнения и метод подгонки (например, уравнение Кэллендера второго порядка, линейная поправка Кэллендера, и т.д.). Затем калибровочная кривая, подобранная так, чтобы она проходила через точки 270°C, 280°C и 290°C, вычитается из кривых, соответствующих коэффициентам, рассчитанным для каждой комбинации, и результат

Таблица 5.17. Возможные комбинации значений температуры для расчета ошибок экстраполяции

Комбинация	270 ± 0,05 °C	280 ± 0,05 °C	290 ± 0,05 °C
1	269,95	279,95	289,95
2	270,05	279,95	289,95
3	269,95	280,05	289,95
4	270,05	280,05	289,95
5	269,95	279,95	290,05
6	270,05	279,95	290,05
7	269,95	280,05	290,05
8	270,05	280,05	290,05

Идентификационный номер

1BB-T-0450-W

Данные повторной калибровки

Температура (°C)	Сопротивление (Ом)	Погрешность (°C)
292.81	209.212	0.047
279.50	204.489	0.047
266.20	199.705	0.047

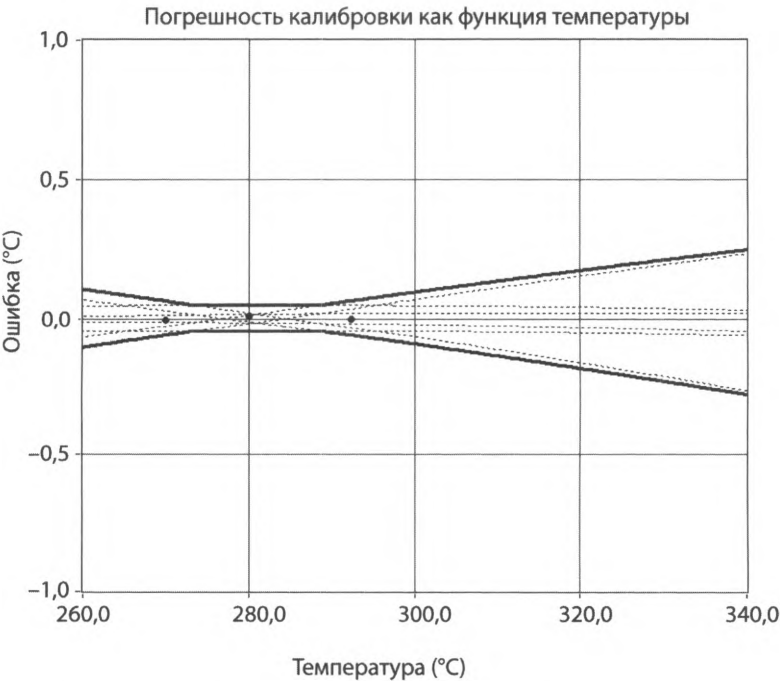


Рис. 5.15. Ошибки экстраполяции при использовании линейной зависимости

изображается графически, как показано на рис. 5.14. Очевидно, что ошибка экстраполяции меньше, если используется линейная поправка, как это видно на рис. 5.15. Так происходит потому, что при выходе температурной точки за пределы диапазона данных, использованных в расчетах, разность значений, подсчитанных по линейной зависимости, всегда меньше, чем разность для квадратной зависимости.

На рис. 5.14 представлены ошибки для наиболее неблагоприятного случая, предполагающего, что флуктуации температуры могут происходить с достижением при каждой температуре крайних значений диапазона погрешности. На самом деле, погрешность данных, собранных в течение короткого отрезка времени, будет представлять собой систематическую ошибку примерно той же величины в пределах рассчитанной погрешности. В этом смысле, реальная ошибка экстраполяции будет обычно гораздо меньше, чем наихудший случай, представленный на рис. 5.14.

Полная таблица повторной калибровки для ТДС–выброса представлена в таблице 5.18 с шагом в один градус для диапазона температуры от 0 до 400°C. Эта таблица содержит величины сопротивления ТДС при каждой температуре и основана на использовании квадратного уравнения.

5.14. Позиция NRC по вопросу о перекрестной калибровке

Позиция Комиссии по ядерному регулированию (NRC) по вопросу о перекрестной калибровке отражена в документе NUREG-0800 [10], в частности в приложении к главе 7 этого документа, называемом также *Технической позицией отрасли 13* или *ВТР-13*, изложена точка зрения NRC на проверку характеристик ТДС, включая проверку как времени реакции, так и калибровки. Основными положениями ВТР-13 являются:

- Характеристики ТДС должны оцениваться исходя из его точности и времени реакции. Для обеспечения удовлетворительной работы ТДС следует проверять его точность и время реакции.
- В данные тестирования датчика методом перекрестной калибровки следует вносить поправки на флуктуацию и дрейф температуры рабочей среды, которые могут иметь место во время тестирования.
- Метод перекрестной калибровки, а также данные калибровки и времени реакции должны проверяться с целью обнаружения неточностей, погрешностей и ошибок.

Копия документа ВТР-13 приведена в этой книге в Приложении В.

Таблица 5.18. Таблица повторной калибровки ТДС

Константа	Значение	Единицы
R_0	99,189	Ом
A	3,993068E-3	1/°C
B	-6,997264E-7	1/°C/°C

Темп- ра(°C)	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
0	99,19	99,59	99,98	100,38	100,77	101,17	101,56	101,96	102,35	102,75
10	103,14	103,54	103,93	104,33	104,72	105,11	105,51	105,90	106,30	106,69
20	107,08	107,48	107,87	108,26	108,66	109,05	109,44	109,83	110,22	110,62
30	111,01	111,40	111,79	112,18	112,58	112,97	113,36	113,75	114,14	114,53
40	114,92	115,31	115,70	116,09	116,48	116,87	117,26	117,65	118,04	118,43
50	118,82	119,21	119,60	119,99	120,37	120,76	121,15	121,54	121,93	122,32
60	122,70	123,09	123,48	123,87	124,25	124,64	125,03	125,41	125,80	126,19
70	126,57	126,96	127,35	127,73	128,12	128,50	128,89	129,28	129,66	130,05
80	130,43	130,82	131,20	131,59	131,97	132,35	132,74	133,12	133,51	133,89
90	134,27	134,66	135,04	135,42	135,81	136,19	136,57	136,96	137,34	137,72
100	138,10	138,48	138,87	139,25	139,63	140,01	140,39	140,77	141,16	141,54
110	141,92	142,30	142,68	143,06	143,44	143,82	144,20	144,58	144,96	145,34
120	145,72	146,10	146,48	146,86	147,23	147,61	147,99	148,37	148,75	149,13
130	149,51	149,88	150,26	150,64	151,02	151,39	151,77	152,15	152,53	152,90
140	153,28	153,66	154,03	154,41	154,78	155,16	155,54	155,91	156,29	156,66
150	157,04	157,41	157,79	158,16	158,54	158,91	159,29	159,66	160,04	160,41
160	160,78	161,16	161,53	161,90	162,28	162,65	163,02	163,40	163,77	164,14
170	164,52	164,89	165,26	165,63	166,00	166,38	166,75	167,12	167,49	167,86
180	168,23	168,60	168,98	169,35	169,72	170,09	170,46	170,83	171,20	171,57
190	171,94	172,31	172,68	173,05	173,41	173,78	174,15	174,52	174,89	175,26
200	175,63	176,00	176,36	176,73	177,10	177,47	177,83	178,20	178,57	178,94
210	179,30	179,67	180,04	180,40	180,77	181,14	181,50	181,87	182,23	182,60
220	182,97	183,33	183,70	184,06	184,43	184,79	185,16	185,52	185,89	186,25
230	186,61	186,98	187,34	187,71	188,07	188,43	188,80	189,16	189,52	189,89
240	190,25	190,61	190,97	191,34	191,70	192,06	192,42	192,78	193,15	193,51
250	193,87	194,23	194,59	194,95	195,31	195,67	196,03	196,40	196,76	197,12
260	197,48	197,84	198,20	198,56	198,91	199,27	199,63	199,99	200,35	200,71
270	201,07	201,43	201,79	202,14	202,50	202,86	203,22	203,58	203,93	204,29
280	204,65	205,00	205,36	205,72	206,08	206,43	206,79	207,14	207,50	207,86
290	208,21	208,57	208,92	209,28	209,63	209,99	210,35	210,70	211,05	211,41
300	211,76	212,12	212,47	212,83	213,18	213,53	213,89	214,24	214,59	214,95
310	215,30	215,65	216,01	216,36	216,71	217,06	217,42	217,77	218,12	218,47
320	218,82	219,18	219,53	219,88	220,23	220,58	220,93	221,28	221,63	221,98
330	222,33	222,68	223,03	223,38	223,73	224,08	224,43	224,78	225,13	225,48
340	225,83	226,18	226,53	226,88	227,22	227,57	227,92	228,27	228,62	228,96
350	229,31	229,66	230,01	230,35	230,70	231,05	231,39	231,74	232,09	232,43
360	232,78	233,13	233,47	233,82	234,16	234,51	234,85	235,20	235,54	235,89
370	236,23	236,58	236,92	237,27	237,61	237,96	238,30	238,64	238,99	239,33
380	239,67	240,02	240,36	240,70	241,05	241,39	241,73	242,07	242,42	242,76
390	243,10	243,44	243,78	244,13	244,47	244,81	245,15	245,49	245,83	246,17

ПРОВЕРКА ВРЕМЕНИ РЕАКЦИИ ТДС И ТЕРМОПАР

6.1. Цели проверки

Проверка времени реакции ТДС и термопар без демонтажа датчиков проводится на АЭС по крайней мере с одной из следующих целей:

1. Измерить время реакции датчика в рабочих условиях, как того требуют технические условия и (или) предписания надзорных органов.
2. Проверить, что датчики входят в термоканалы до конца и в термоканалах нет воздушных зазоров, загрязнений и посторонних тел.
3. Обосновать упреждающее техобслуживание путем раннего обнаружения отказов для последующего управления процессом старения датчиков и установления объективно обоснованного графика их замены.
4. Отличить неисправности датчика от неисправностей кабеля или соединительных разъемов.
5. Выявить отклонения от нормы в работе датчиков или в технологическом процессе.

Почти для всех станций с реакторами PWR американского производства существует требование проверки времени реакции ТДС, и такая проверка производится один раз за кампанию реактора для одного или большего числа каналов измерений. Проверка времени реакции термопар не является обязательной, но на некоторых станциях подобное тестирование проводится, по крайней мере с одной из указанных выше целей.

6.2. Традиционные методы определения времени реакции

Традиционно динамическая характеристика ТДС и термопар характеризовалось одним параметром, известным как *постоянная времени для погружения* (τ). Она определяется как время, которое требуется для того, чтобы сигнал на выходе датчика достиг 63,2% от своего окончательного установившегося значения после ступенчатого изменения температуры на поверхности датчика. Подобное ступенчатое изменение температуры обычно достигается при мгновенном погружении датчика во вращающийся бак с водой, скорость которой по отношению к датчику составляет 1 м/с, при этом температура воды должна быть либо выше, либо ниже температуры датчика. Измерение параметра τ при помощи этой процедуры носит название *метода погружения*.

До 1977 года проверка времени реакции датчиков температуры на АЭС почти всегда проводилась при помощи метода погружения, хотя для АЭС этот метод неудобен тем, что датчик надо демонтировать из контура охлаждения реактора и направлять в лабораторию для проведения испытаний. В лаборатории трудно воспроизвести давление в 150 бар (2250 psi или 15 000 кПа) и температуру в 300°C (572°F), характерные для условий работы датчиков на реакторной установке. По этой причине все лабораторные испытания проводились при гораздо более мягких условиях, а результаты экстраполировались на рабочие условия. Совокупность операций по снятию датчика и расчетов по экстраполяции результатов на рабочие условия влечет за собой значительные ошибки в измерении времени реакции, иногда приводящие к результату, в три раза отличающемуся от истинного значения [11]. Эти недостатки метода погружения заставили искать лучшие способы проверки времени реакции датчиков температуры, используемых на АЭС. В результате были разработаны и внедрены следующие методы:

- Метод реакции на ступенчатое изменение петлевого тока (РСПТ). При тестировании датчиков методом РСПТ производится нагрев чувствительного элемента датчика электрическим током и регистрируется переходный процесс изменения температуры элемента. На основе этого переходного процесса определяется время реакции датчика на изменения внешней температуры. Метод используется как для ТДС, так и для термопар.
- Измерение коэффициента самонагрева. Этот метод применим только для ТДС и используется не для измерения времени реакции, а для обнаружения его изменений. Так же как и в методе

РСПТ, в этом методе используется нагрев чувствительного элемента пропусканием через него электрического тока. После того, как сигнал от датчика стабилизируется, измеряется установившееся увеличение сопротивления ТДС как функция от электрической мощности, подаваемой на датчик; результат измерений носит название коэффициента самонагрева (КСН). Любое значительное изменение КСН указывает на изменение времени реакции ТДС. Поэтому можно отслеживать изменения КСН, чтобы обнаружить ухудшение времени реакции ТДС.

- Метод анализа шумов. В этом методе регистрируются естественные флуктуации (шумы), которые обычно имеют место в выходном сигнале датчика во время работы станции, и проводится их анализ с целью определить время реакции датчика. Метод полезен для проверки времени реакции ТДС, термопар и других датчиков.

Сравнение указанных выше методов приведено в таблице 6.1, а пояснения к таблице приведены ниже в данной главе. Основное внимание будет уделено методу РСПТ и ТДС, потому что: (1) РСПТ является наиболее часто применяемым методом определения времени реакции температурных датчиков, и (2) к ТДС предъявляются на АЭС более жесткие требования в отношении проверки времени реакции, чем к термопарам.

6.3. Метод РСПТ

Метод РСПТ был разработан для измерения времени реакции ТДС и термопар дистанционно, не удаляя датчики с мест их установки в технологическом оборудовании. При испытании этим методом через датчик пропускают электрический ток, используя для этой цели соединительные провода и внешний источник тока. Ток нагревает датчик, что приводит к изменению его температуры. Во время тестирования методом РСПТ регистрируется зависимость температуры от времени, выражающаяся либо в повышении температуры при прохождении тока, либо в ее понижении после его выключения. Обработка данных графика этой зависимости при помощи преобразований РСПТ позволяет определить время реакции датчика.

Испытание методом РСПТ учитывает влияние на реакцию датчика всех условий его установки и технологического процесса и поэтому позволяет получить реальное «рабочее» время реакции датчика.

Таблица 6.1. Характеристики методов для проверки времени реакции ТДС и термопар на АЭС

Метод проверки	Применимость	Где выполняется	Надо ли отключать датчик?	Сложность измерений	Качество измерений
Метод погружения	ТДС и термопары	В лаборатории	Да	Надо снимать датчик и испытывать в лаборатории	Методом погружения τ определяется непосредственно, но качество измерений низкое по трем причинам: (1) операции по снятию ТДС могут изменить время его реакции; (2) в лаборатории обычно нельзя воспроизвести рабочие условия, и поэтому результаты приходится на эти условия экстраполировать; и (3) для ТДС в термоканалах метод погружения применим только, если ТДС испытывается с тем же термоканалом, который используется на станции. Совокупное влияние этих трех элементов может привести к очень большим ошибкам
Метод РСПТ	ТДС и термопары	На месте установки датчика	Да	Для испытаний нужно специальное оборудование	- РСПТ является самым точным методом измерения времени реакции датчиков без демонтажа. - РСПТ позволяет определить τ ТДС или термопары без удаления датчика со станции. - Результаты обычно обладают точностью не хуже 10%. - Результаты учитывают влияние на время реакции рабочих условий и места установки датчика
Метод самонагрева	ТДС	На месте установки датчика	Да	Метод прост, используется стандартное электронное оборудование для испытаний. Анализ данных прост	- КСН может быть измерен вполне точно. - Изменения КСН позволяют обнаружить крупные изменения времени реакции ТДС. - Точной корреляции между τ и КСН не существует
Метод анализа шумов	ТДС и термопары	На месте установки датчика	Нет	Требуется специальное оборудование. Анализ данных требует специальных знаний	Полезный способ для обнаружения деградации времени реакции ТДС. Не так точен, как РСПТ, но метод пассивный и может применяться для одновременной проверки большого числа датчиков

6.3.1. Испытательное оборудование

Испытательное оборудование для метода РСПТ для ТДС и для термопар значительно отличается. Вначале будет рассмотрено оборудование для испытаний ТДС.

Испытания ТДС проводятся с использованием моста сопротивлений Уитстона (рис. 6.1). Вначале мост уравнивается при силе постоянного тока, пропускаемого через ТДС, равной от 1 до 2 мА. Затем включается «большой» ток (примерно от 30 до 50 мА), при этом чувствительный элемент ТДС постепенно нагревается и достигает установившегося значения температуры, превышающего на несколько градусов температуру среды, окружающей датчик. Прирост температуры внутри ТДС зависит от силы нагревающего тока и от скорости передачи тепла от ТДС к окружающей среде. Типичное повышение температуры ТДС во время испытания методом РСПТ составляет от 5 до 15°C.

На рис. 6.2 представлены два переходных процесса РСПТ: один для ТДС прямого погружения, другой для ТДС, установленного в термоканал —

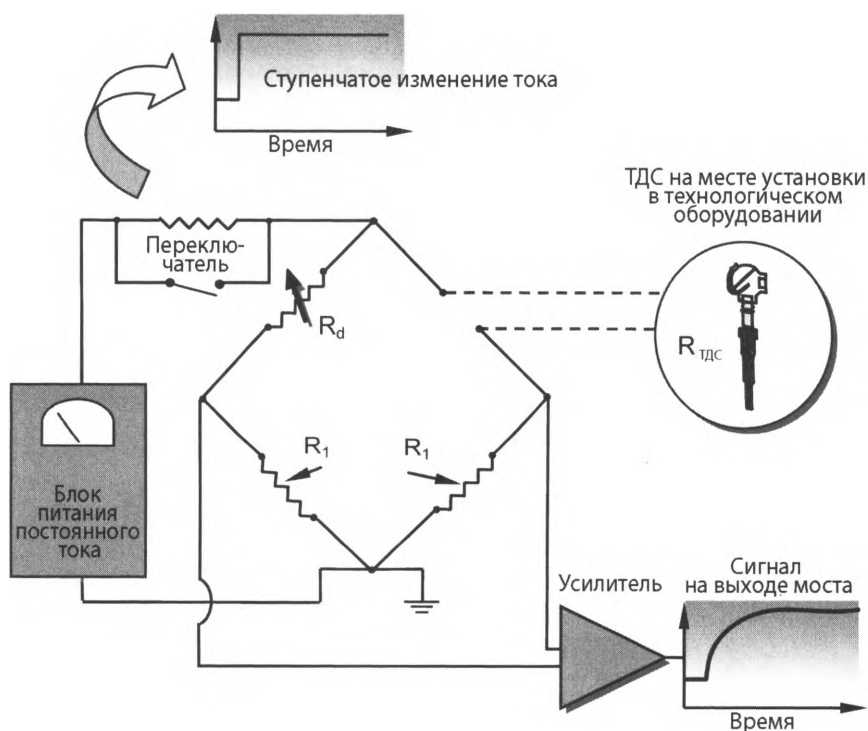
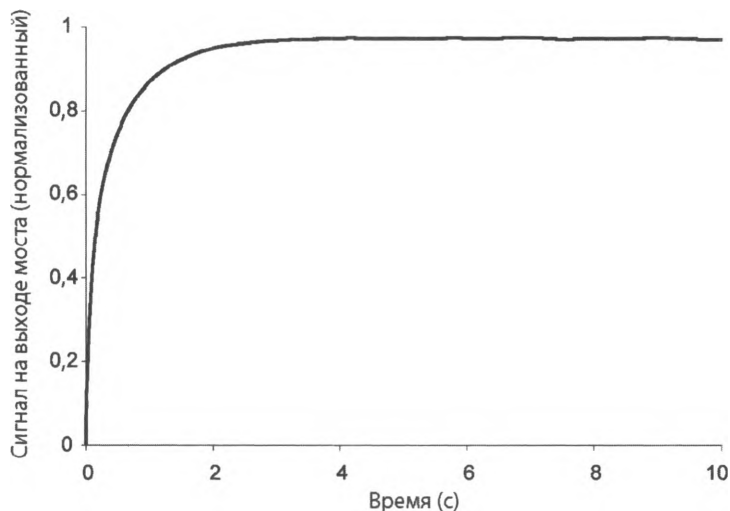
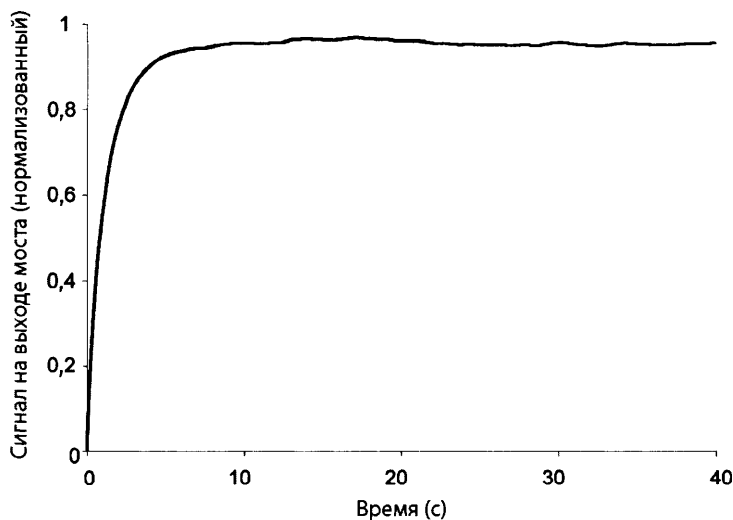


Рис. 6.1. Мост Уитстона для проверки ТДС методом РСПТ



а) ТДС прямого погружения



б) ТДС в термоканале

Рис. 6.2. Полученные на АЭС данные испытаний методом РСПТ для ТДС прямого погружения и ТДС с термоканалом

оба были получены при испытаниях на АЭС с использованием нагревающего тока силой примерно 40 мА. Очевидно, что ТДС прямого погружения, имеющий более короткое время реакции, нагревается быстрее, чем ТДС с термоканалом. Так как переходные процессы были вызваны нагревом датчиков изнутри, то полученные результаты нельзя использовать без корреляции для определения реального времени реакции.

Для получения необходимой для метода РСПТ силы тока источник питания моста Уитстона регулируется так, чтобы силу тока можно было устанавливать от 30 до 50 мА, в зависимости от ТДС и технологического процесса, параметры которого измеряются. Если процесс отличается постоянством температуры, то 30 мА обычно достаточно. Если же ТДС установлен в процессе, отличающемся большими температурными флуктуациями, то для улучшения соотношения между сигналом и шумом требуется более сильный ток (например, 50 мА). На выходе моста Уитстона можно также поставить усилитель для регулировки амплитуды сигнала РСПТ в той степени, в какой это необходимо.

Выходное напряжение (V) на выходе моста Уитстона во время испытания методом РСПТ изменяется почти линейно в зависимости от изменения сопротивления ТДС (δR). Простой анализ электрической цепи показывает, что сигнал на выходе моста равен (см. рис. 6.1):

$$V = \frac{R_1(R_{\text{ТДС}} - R_d)}{(R_1 + R_d)(R_1 + R_{\text{ТДС}})} E \quad (6.1)$$

где E – напряжение источника питания моста.

Когда перед тестированием методом РСПТ мост уравнивается, то $R_{\text{ТДС}} = R_d$ и $V = 0$. Как только в начале испытания ток увеличивается, сигнал на выходе моста увеличивается экспоненциально, а сопротивление ТДС увеличивается до величины $R_{\text{ТДС}} + \delta R$. В конце концов напряжение на выходе моста достигает установившегося значения и, учитывая вышесказанное, напряжение на выходе моста можно записать в виде:

$$V = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_d} \right) \left(\frac{\delta R}{R_1 + R_d + \delta R} \right) E \quad (6.2)$$

Если предположить, что $(R_1 + R_d)$ намного больше, чем δR , то можно записать:

$$V = C \delta R E \quad (6.3)$$

где C – некая константа.

Уравнение 6.3 показывает, что сигнал на выходе моста изменяется линейно с изменением δR до тех пор, пока $(R_1 + R_d)$ намного больше, чем δR . Обычно δR меньше 10 Ом, а $R_1 + R_d$ находится в диапазоне от 300 до 600 Ом, в зависимости от ТДС и температуры окружающей его среды. Поэтому обычно можно действительно считать, что V зависит линейно от δR . Если надо, то R_1 можно сделать достаточно большим для

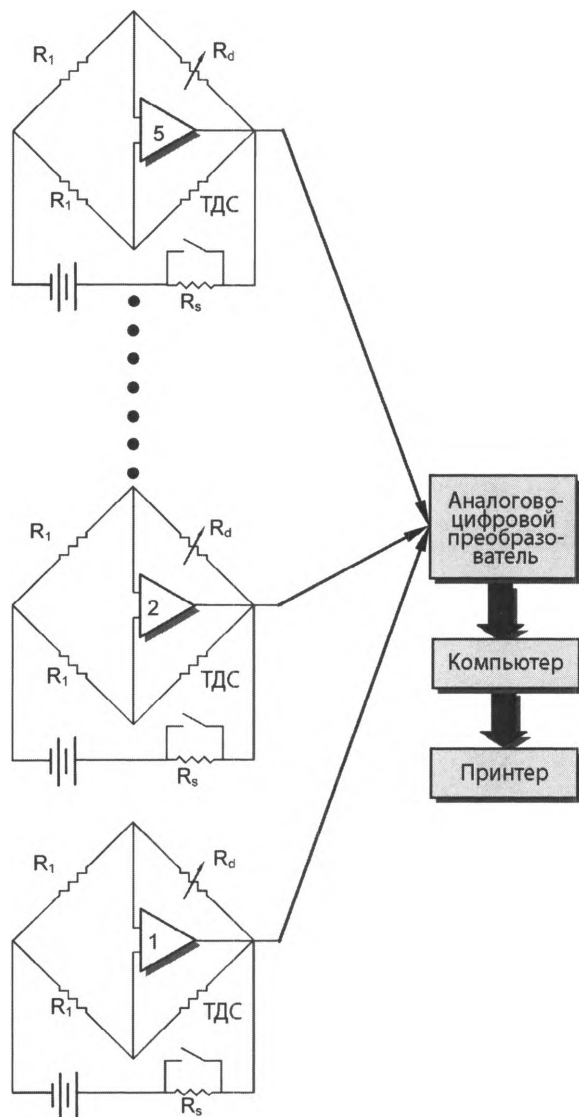


Рис. 6.3. Блок-схема многоканальной установки для испытаний методом РСПТ

того, чтобы условие линейности выполнялось, но сопротивления от 100 до 200 Ом обычно достаточны.

В прошлом, тестирование методом РСПТ проводилось по отдельности для каждого ТДС, но в начале 2000 года было разработано новое оборудование для того, чтобы можно было проверять сразу несколько ТДС. Типичным является одновременная проверка от четырех до шести ТДС. На рис. 6.3 показана блок-схема многоканальной установки для

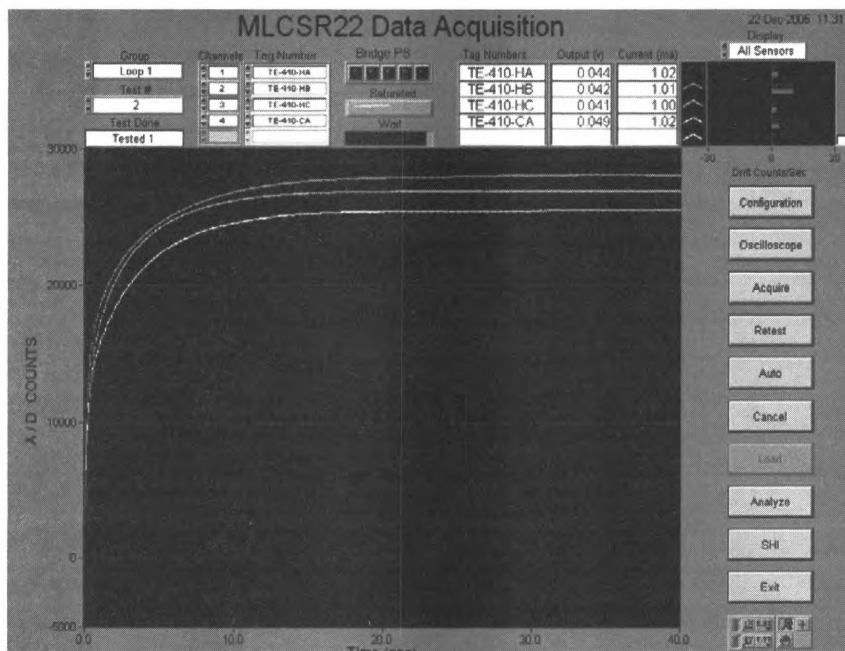


Рис. 6.4. Вид экрана при работе программного обеспечения для получения данных методом РСПТ

испытаний методом РСПТ: из схемы видно, что данная система включает в себя не только мосты Уитстона, но и блок для регистрации цифровых данных, который используется для сбора и анализа данных РСПТ.

На рис. 6.4 показан вид экрана монитора системы для испытаний РСПТ, на который выведены данные РСПТ для четырех ТДС. Данные РСПТ для ТДС обычно отбираются с интервалами от 0,001 до 0,04 с в зависимости от ожидаемого значения времени реакции датчика и условий, при которых проводится его проверка. Обычно время отбора данных составляет от 2 до 20 с для ТДС прямого погружения и от 20 до 60 с для ТДС с термоканалами, когда эти датчики испытываются в потоке воды.

Процедура испытания термопар методом РСПТ сильно отличается от процедуры для ТДС, хотя принцип проверки и анализа данных тот же самый. В частности, при испытании термопар для нагрева датчика чаще используется переменный ток, а не постоянный. Это объясняется тем, что при переменном токе происходит взаимокompенсация электротермического эффекта Пельтье на спае термопары. К тому же, при испытаниях термопар обычно требуются более высокие значения тока (например, 500 мА), так как сопротивление контура термопары распределено по всей ее длине, в отличие от ТДС, где основное сопротивление

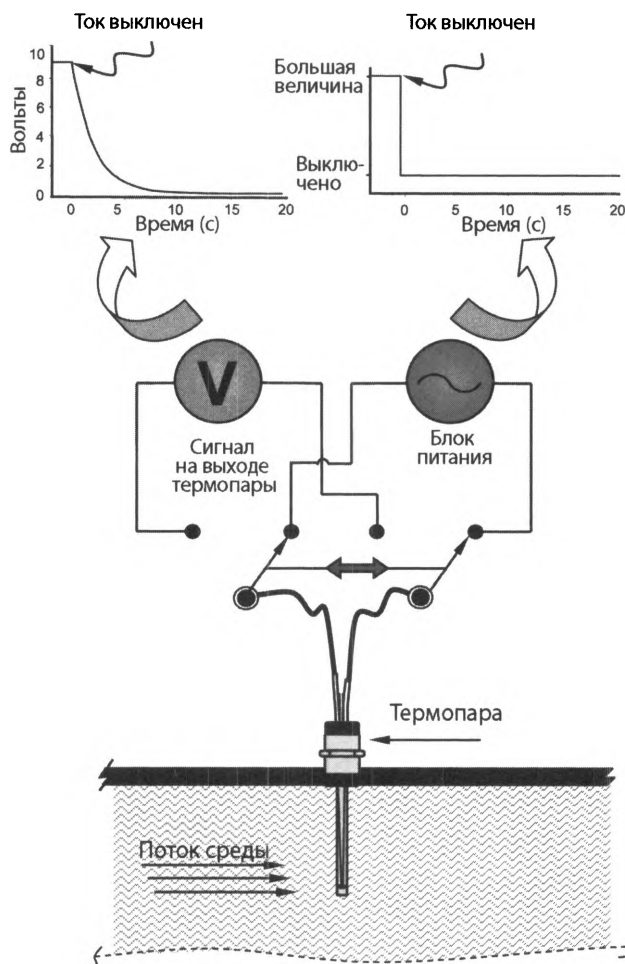
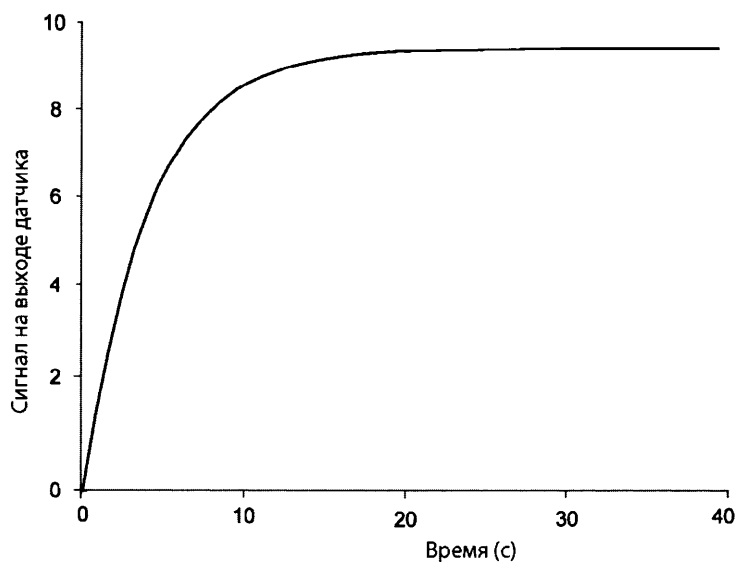


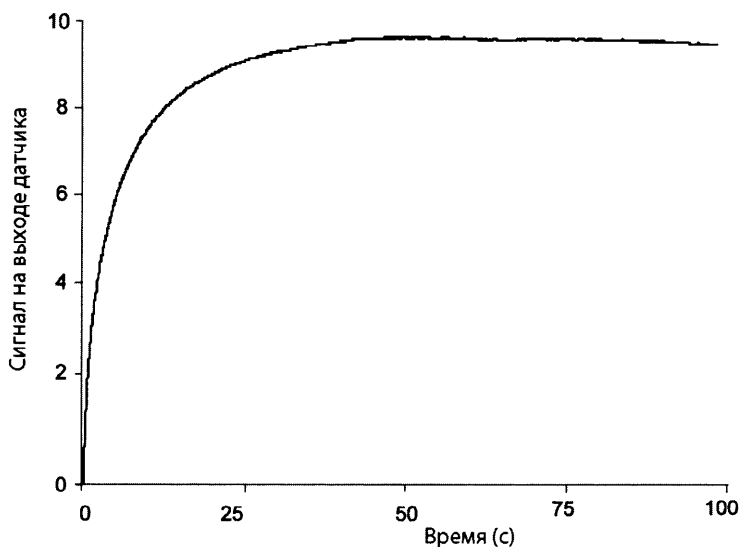
Рис. 6.5. Комплект оборудования для испытаний термопар методом РСПТ

приходится на чувствительный элемент. Таким образом, при тестировании термопар ток РСПТ нагревает всю термопару.

При испытаниях ТДС данные РСПТ собираются в то время, когда ток пропускается через электрическую цепь и ТДС подвергается нагреву. Для термопар, данные РСПТ собираются после выключения тока во время охлаждения термопары, то есть при тестировании термопар ток пускают на несколько секунд и затем выключают, при этом выходной сигнал термопары регистрируется, и она охлаждается до температуры окружающей ее среды (рис. 6.5).



а) Испытание в лаборатории при скорости воды 1 м/с



б) Испытание на АЭС с реактором PWR

Рис. 6.6. Переходные процессы РСПТ при испытаниях термопар в лабораторных условиях и на АЭС

Переходный процесс, сопровождающий охлаждение термопары, в основном определяется изменением температуры на спае термопары, хотя соединительные провода термопары также нагреваются и охлаждаются во время испытания РСПТ.

Для получения времени реакции термопары переходный процесс термопары анализируют с использованием той же процедуры, что и для ТДС. Поэтому график переходного процесса для термопар часто инвертируют при построении графической зависимости для исходных данных. На рис. 6.6 показаны типичные переходные процессы при испытаниях термопар в лабораторных условиях и на работающих станциях.

6.3.2. Преобразование РСПТ

Метод РСПТ основан на том, что внутри датчика вызывают ступенчатое изменение температуры, хотя динамическая реакция датчика определяется как его реакция на это изменение снаружи. Существует способ преобразовать переходный процесс РСПТ, полученный при внутреннем нагреве, таким образом, чтобы определить время реакции на ступенчатое изменение температуры снаружи датчика. На рис. 6.7 сравниваются исходный переходный процесс РСПТ для ТДС, преобразованный переходный процесс для него, а также реакция датчика на ступенчатое изменение температуры снаружи, полученное при испытании методом погружения. Эти данные были получены в лабораторных испытаниях, при которых ТДС помещался во вращающийся бак с водой при комнатной температуре, атмосферном давлении и скоростью потока воды 1 м/с относительно датчика.

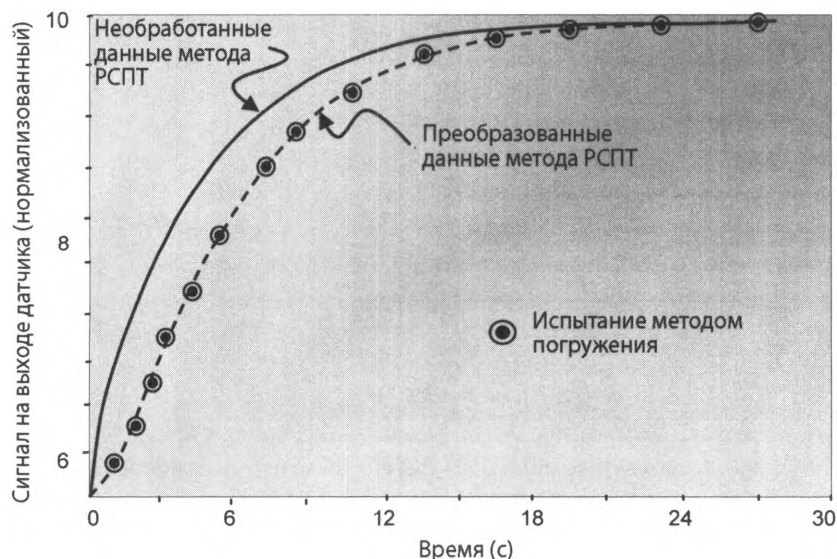


Рис. 6.7. Сравнение исходных и преобразованных данных РСПТ с соответствующим переходным процессом, полученным в лабораторных испытаниях методом погружения

Процесс преобразования данных РСПТ называют *преобразованием РСПТ*. Это преобразование, одинаковое для ТДС и термопар, было разработано в середине 1970-х годов профессором Теннессийского университета Т.У.Керлиным (Т.W.Kerlin), а подтверждение его правильности получено автором данной книги [12]. В этой работе была получена следующая формула, которую называют *уравнением РСПТ*:

$$T(t) = A_0 + A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} + \dots + A_n e^{-t/\tau_n} \quad (6.4)$$

где $T(t)$ является переходным процессом РСПТ, а $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ называют *модальными постоянными времени*. Эти постоянные связаны с временем реакции датчика τ следующим уравнением [13]:

$$\tau = \tau_1 \left[1 - \ln \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) - \ln \left(1 - \frac{\tau_3}{\tau_1} \right) - \dots - \ln \left(1 - \frac{\tau_n}{\tau_1} \right) \right] \quad (6.5)$$

где $\ln$ обозначает натуральный логарифм, а n есть число модальных постоянных времени.

В уравнении 6.5 величина τ равна времени реакции датчика на ступенчатое изменение температуры рабочей среды снаружи датчика, т. е. τ — время, которое необходимо для того, чтобы сигнал датчика достиг 63,2% от своего окончательного установившегося значения в ответ на ступенчатое изменение температуры среды снаружи датчика.

Уравнение 6.4 было получено на основе узловой модели теплопередачи; в частности, для неомогенной цилиндрической модели, представляющей чувствительный элемент датчика температуры, были записаны уравнения теплового баланса в конечно-разностной форме и найдено их решение. Были сделаны следующие выводы:

- Динамическая реакция неомогенного цилиндрического датчика температуры, каким является ТДС или термопара, выражается экспоненциальным рядом согласно уравнению 6.4. Форма этого уравнения неизменна, вносится ли возмущение в датчик изнутри, как при испытании методом РСПТ, или снаружи, как при испытании методом погружения.
- Экспоненциальные члены ряда в уравнении 6.4 ($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$) зависят от геометрии датчика и его тепловых свойств, а не от того, вносится ли возмущение изнутри или снаружи. Коэффициенты ($A_0, A_1, \dots, A_n$) при них, однако, зависят от вынуждающей функции (т.е., нагревается ли датчик изнутри или снаружи).

- При использовании терминологии представления динамической реакции при помощи передаточной функции, модальные постоянные времени ($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$) соответствуют полюсам ($p_1, p_2, \dots, p_n$) передаточной функции, а коэффициенты ($A_0, A_1, \dots, A_n$) являются либо функциями только полюсов, либо как полюсов, так и нулей ($z_1, z_2, \dots, z_n$) передаточной функции. Нули зависят от положения источника тепла, а полюса – только от геометрии и тепловых свойств датчика. Для метода погружения передаточная функция имеет только полюса, а для метода РСПТ – как полюса, так и нули.
- Как показано в уравнении 6.5, время реакции датчика (τ) является функцией только модальных постоянных времени ($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$), но не коэффициентов ($A_0, A_1, \dots, A_n$) в уравнении 6.4.

Те же самые выводы были получены для гомогенных цилиндрических моделей датчика температуры. В частности, переходные процессы теплопередачи в одномерном сплошном цилиндре и одномерном полем цилиндре анализировались на базе непрерывной аналитической модели, в отличие от подхода, использующего узловую модель теплопередачи. Оказалось, что численные результаты узлового и непрерывного подходов для многочисленных имитаций отличались друг от друга менее, чем на 2%. Этот результат показывает, что оба решения практически одинаковы. В частности, подход с непрерывной моделью показал, что собственные значения для функции, описывающей реакцию датчика на ступенчатое изменение температуры чувствительного элемента внутри датчика (метод РСПТ), те же самые, что и для реакции датчика на ступенчатое изменение температуры на его поверхности (метод погружения). Этого следовало ожидать, так как граничные условия для обеих реакций одинаковы. Более того, подход с использованием непрерывной модели показал, что коэффициенты разложения в ряд в результатах, полученных аналитически для гомогенного цилиндра, отличаются в случаях РСПТ и метода погружения. Этого также следовало ожидать, так как вынуждающие функции для этих двух методов различны.

Анализ непрерывной модели также продемонстрировал важную роль, которую модуль Био (N_{Bi}) играет в описании теплового процесса в гомогенной модели датчика. Модуль Био является отношением внутреннего сопротивления датчика теплопередаче к сопротивлению теплопередаче на его поверхности и определяется формулой:

$$N_{Bi} = \frac{\text{Внутреннее сопротивление теплопередаче}}{\text{Внешнее сопротивление теплопередаче}} = \frac{h}{k/R} = \frac{hR}{k} \quad (6.6)$$

Таблица 6.2. Соотношения между модулем Био и модальными постоянными времени для гипотетического датчика температуры

Модуль Био	τ_2/τ_1	Нормализованное время реакции (с)
0,4	21,69	2,0040
1	10,49	1,000
2	7,18	0,6713
5	5,64	0,4740
10	5,34	0,5049
20	5,28	0,3719

Время реакции приведено к 1 при модуле Био, равном 1.

Источник данных: Специальный доклад фирмы AMS для NRC [2].

где h есть коэффициент теплопередачи на поверхности концевой части датчика, где находится чувствительный элемент, R — внешний диаметр концевой части датчика, а k — теплопроводимость внутренних частей датчика в районе его концевой части.

Модуль Био помогает определить как свойства рабочей среды (например, скорость потока, температура или давление) влияют на время реакции датчика. Более того, модуль Био влияет на интервалы между собственными значениями ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) решения, относящегося к непрерывным моделям теплопередачи для датчиков температуры; с другой стороны, модальные постоянные времени (τ_i), используемые для вычисления времени реакции датчика (τ) при помощи уравнения 6.5, обратно пропорциональны величинам $(\lambda_i)^2$, что позволяет сделать вывод, что модуль Био связан с отношением модальных постоянных времени. Эта связь видна из числовых результатов, представленных в таблице 6.2 для гипотетического датчика температуры. Когда модуль Био невелик (например, от 0,1 до 0,5), полное сопротивление датчика теплопередаче в основном определяется сопротивлением поверхностной пленки, и отношение τ_2/τ_1 велико. Это означает, что постоянные более высокого порядка ($\tau_2, \tau_3, \dots$) не имеют такого большого значения, как τ_1 , при определении полного времени реакции датчика (τ). Более того, время реакции ТДС при небольшой величине модуля Био в основном определяется скоростью потока, температурой и давлением среды.

Когда модуль Био велик (например, равен 10), полное сопротивление теплопередаче в основном зависит от внутреннего сопротивления, и отношение τ_2/τ_1 не очень велико. Это означает, что (1) скорость потока среды и другие поверхностные параметры не влияют на полное

время реакции датчика и (2) важную роль для определения полного времени реакции датчика (τ) играют постоянные времени более высокого порядка ($\tau_2, \tau_3, \dots$).

Расчеты модуля Био были проведены для ТДС типа Rosemount Model 104 (датчик с термоканалом, имеющий большое внутреннее сопротивление теплопередаче) и для ТДС типа Rosemount Model 176 (датчик прямого погружения, у которого чувствительный элемент прикреплен к внутренней поверхности чехла, приводя к очень небольшому внутреннему сопротивлению). Результаты расчетов представлены в таблице 6.3 для лабораторных условий и условий на АЭС.

Данные таблицы 6.3 показывают, что при переходе от лабораторных условий к условиям на АЭС модуль Био в этом примере увеличивается для обоих ТДС примерно в десять раз. Отметим, однако, что оба расчета подобного типа и измерения времени реакции датчика в различных рабочих средах показали, что динамическая реакция датчика при одном режиме теплопередачи мало что говорит о реакции датчика при другом режиме.

Модуль Био помогает также определить число собственных значений (λ_i), необходимых для получения правильных результатов тестирования методом РСПТ. В таблице 6.4 представлена взаимосвязь между числом собственных значений (N) и отношением времени реакции гипотетического датчика, определенного методом РСПТ ($\tau_{\text{РСПТ}}$), к истинному значению времени реакции (τ истинное). Эти отношения представлены для двух различных величин модуля Био [14]. Данные показывают, что при учете двух собственных значений результаты РСПТ при модуле Био, равном 1, отличаются от истинного времени реакции на 7%, в то время как при модуле Био, равном 100, это отличие составляет 17%. Таким образом, важность модальных постоянных

Таблица 6.3. Модуль Био для двух ТДС фирмы Rosemount

Условия на поверхности ТДС	Модуль Био (hR/k)	
	Rosemount Model 104	Rosemount Model 176
Поток воды в лабораторной установке со скоростью 1 м/с при 80 °C и атмосферном давлении	27	0,34
Рабочий режим реактора PWR (скорость потока воды около 10 м/с при 300 °C и давлении 150 бар)	300	3,8

Источник данных: документ NUREG-0809

Таблица 6.4. Зависимость точности преобразования РСПТ от числа собственных значений

Число собственных значений (N)	$\tau_{\text{РСПТ}} / \tau_{\text{истинное}}$	
	$hR/k = 1$	$hR/k = 100$
1	0,84	0,69
2	0,93	0,83
3	0,95	0,88
4	0,97	0,91
5	0,97	0,93
20	0,99	0,93

Источник данных: Доклад EPRI NRP-459

времени более высокого порядка увеличивается при больших значениях модуля Био. Моды более высокого порядка меньше зависят от величины модуля Био, чем моды более низкого порядка.

Многочисленные публикации конца 1970-х годов содержат подробную информацию о разработке теории метода РСПТ. Автор данной книги недавно собрал и обновил эту информацию для анализа методом конечных разностей в книге «Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности», опубликованной американской организацией ISA в 2005 году¹.

6.3.3. Анализ данных РСПТ

Теоретические выкладки, представленные в предыдущем разделе, можно использовать при расчете времени реакции датчиков для различных условий рабочей среды (для различных значений модуля Био) и воздействующих сигналов (например, для ступенчатого изменения температуры внутри датчика, как в методе РСПТ, или снаружи, как в методе погружения). Однако время реакции реального датчика не может быть получено теоретическим способом: невозможно учесть точную форму или размеры, а также физические свойства датчика и материалов, из которых он сделан. По этой причине теория полезна лишь для определения целесообразности использования экспериментальных данных. В частности, данные РСПТ используют совместно с уравнениями 6.4 и 6.5 для определения времени реакции датчика в реальных условиях его установки и рабочей среды, в которой он находится. При этом применяют следующую процедуру:

¹ Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надёжности. М.: Издательство Бином, 2008.

1. Проводят испытание методом РСПТ и оцифровывают кривую переходного процесса РСПТ.
2. Данные переходного процесса подгоняют под уравнение 6.4 и определяют значения $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ (определять коэффициенты $A_0, A_1, \dots, A_n$ нет необходимости).
3. Значения $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ подставляют в уравнение 6.5 и вычисляют τ .

Эта простая процедура позволяет получить время реакции датчика с хорошей точностью, при условии что: (1) переходный процесс РСПТ достаточно гладкий и может быть легко подогнан к уравнению 6.4, (2) точно определены модальные постоянные времени ($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$) и (3) для испытываемого датчика справедливы допущения относительно процесса теплопередачи, использованные в преобразовании РСПТ. Учет каждого из этих условий сопряжен с трудностями, которые надо преодолеть, чтобы получить надежные результаты измерения времени реакции методом РСПТ. Ниже описывается, как эти трудности можно преодолеть.

Групповое усреднение

На рис. 6.8 показаны три переходных процесса РСПТ для ТДС: одиночный, полученный усреднением 10 процессов и полученный усреднением 40 процессов (данные получены на действующей АЭС). Из рис. 6.8 ясно следует, что одиночный переходный процесс РСПТ не гладок, причинами являются флуктуации температуры, которые могут вызываться такими эффектами, как стратификация температуры и скорости, воздействие регулятора температуры, случайный характер теплопередачи и вибрация. Для получения гладкого переходного процесса используются следующие способы: (1) использование максимально допустимой силы тока для испытаний (50 мА), чтобы улучшить соотношение сигнал/шум, и (2) повторение испытаний ТДС от 10 до 50 раз и усреднение результатов (способом группового усреднения, см. рис. 6.9).

Отфильтровывать флуктуации, присутствующие в переходном процессе РСПТ, обычно не следует, так как это может исказить результаты определения времени реакции. Можно использовать низкочастотный фильтр для удаления высокочастотного шума, вызываемого вибрацией, электрическими помехами или проблемами с заземлением, от которых нельзя избавиться другими способами.

Влияние мод более высокого порядка

Для определения модальных постоянных времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ сглаженный переходный процесс подгоняется под уравнение 6.4. Когда эти постоянные найдены, они используются в уравнении 6.5 для определения

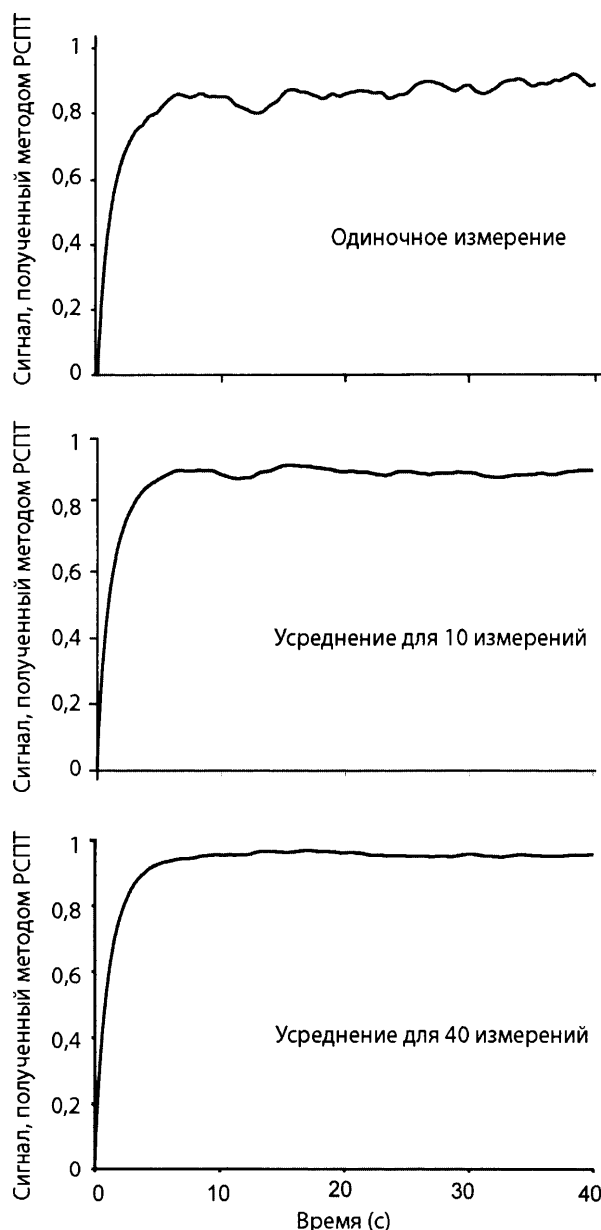


Рис. 6.8. Одиночный и усредненные переходные процессы РСРТ

времени реакции датчика. Хотя в принципе данная процедура проста, найти моды более высоких порядков, чем τ_1 и τ_2 , очень сложно. С этой сложностью столкнулись в конце 1970-х годов, когда было впервые разработано преобразование РСРТ. По этой причине в Теннессийском университете начались новые разработки, в ходе которых У.П. Пур

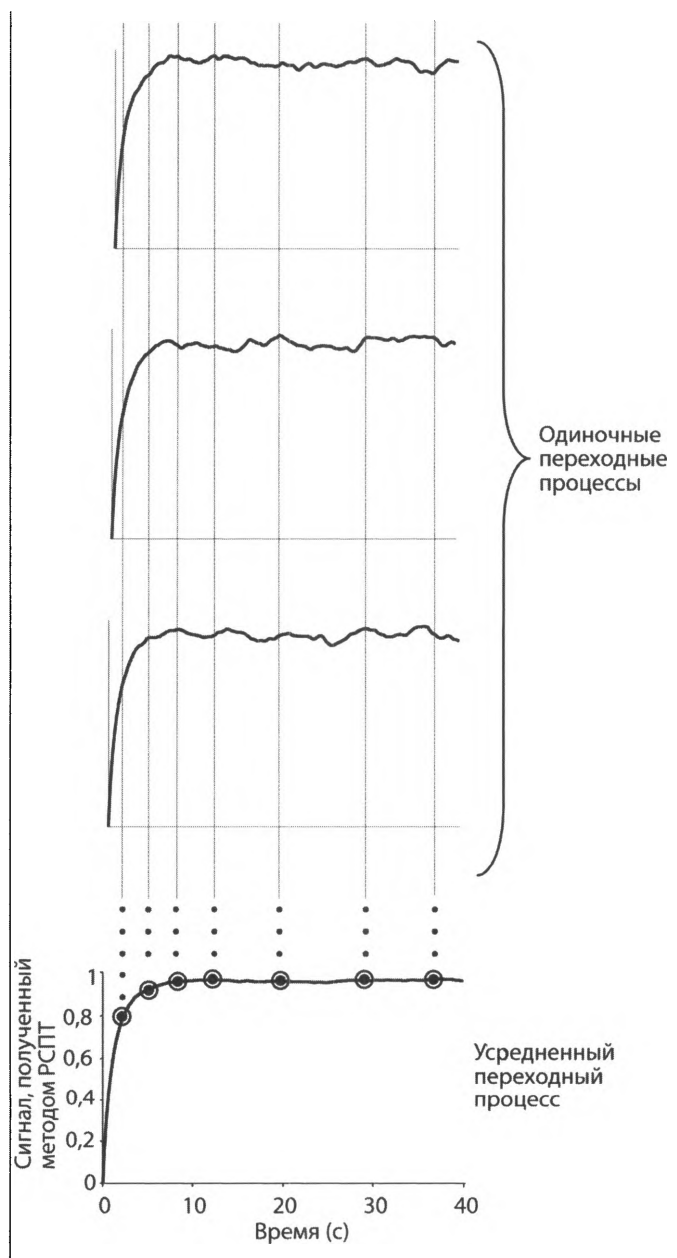


Рис. 6.9. Групповое усреднение переходных процессов РСПТ

(W.H.Poore) нашел, как можно учесть влияние мод РСПТ более высоких порядков (т.е., τ_3 , τ_4 , ..., τ_n). В методе Пура используется полная имитация теплопередачи, основанная на цилиндрической конструкции датчика [13], при этом был проведен как анализ узловой модели

негомогенных датчиков, использующей сгруппированные параметры, так и анализ для непрерывных гомогенных моделей. Для каждого случая было вычислено время реакции гипотетических датчиков для модельных испытаний методами погружения и РСПТ. Пур применил полученные результаты для определения связи между полным временем реакции датчика (τ), полученным методом погружения, и временем реакции, вычисленным лишь с использованием τ_1 и τ_2 и усеченного уравнения 6.5. Было установлено, что полное время реакции температурного датчика связано с отношением τ_2/τ_1 следующим выражением:

$$\tau = f(\tau_2/\tau_1) [\tau_1(1 - \ln(1 - \tau_2/\tau_1))] \quad (6.7)$$

где $f(\tau_2/\tau_1)$ определяется соотношением, представленным на рис. 6.10. Чтобы получить уравнение для $f(\tau_2/\tau_1)$, для сплошной кривой, показанной на рис. 6.10, подбирается полином пятого порядка. Величину, определяемую полученным уравнением, называют *поправочным коэффициентом (ПК) РСПТ*:

$$\begin{aligned} \text{ПК} = & 1,0043 + 0,05578 \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right) + 19,590 \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^2 - 238,38 \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^3 + \\ & + 1352,2 \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^4 - 2622,9 \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^5 \end{aligned} \quad (6.8)$$

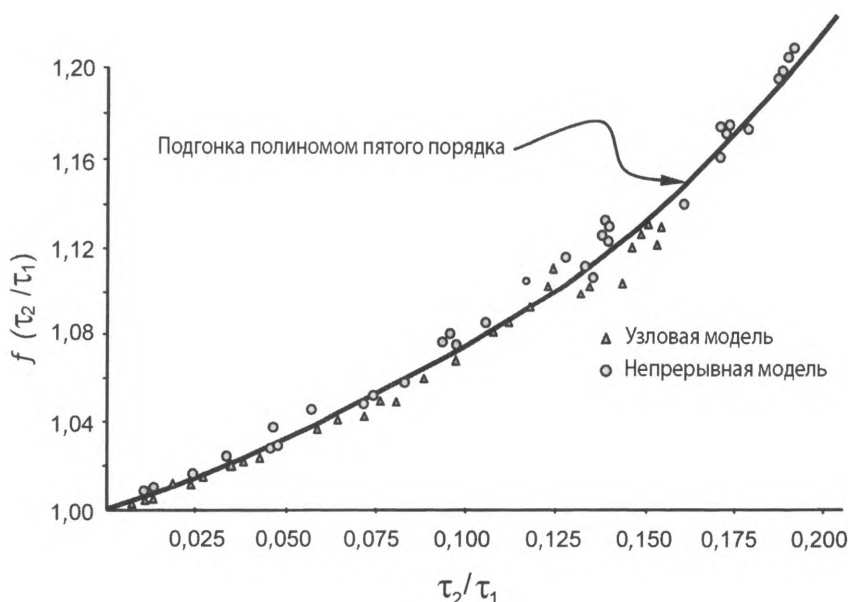


Рис. 6.10. Поправочный коэффициент для метода РСПТ

Таким образом, ПК был определен при помощи математического расчета величины τ , а также величины $\tau_1 [1 - \ln(1 - \tau_2/\tau_1)]$ для нескольких различных гипотетических (теоретических) датчиков и последующего построения графика отношения этих двух величин в зависимости от τ_2/τ_1 . Гипотетические датчики, использованные в этой работе, отличались друг от друга своими размерами и геометрией.

Если из данных РСПТ можно определить лишь τ_1 , то время реакции датчика вычисляется по следующей формуле:

$$\tau = 1,5\tau_1 \quad (6.9)$$

Множитель 1,5 был определен на основе теоретических исследований и его применимость была проверена в лабораторных испытаниях для типовых датчиков.

Выполнение предположений (допущений) метода РСПТ

Применимость метода РСПТ зависит от нескольких предположений (допущений) относительно конструкции и геометрии концевой части датчика, где находится чувствительный элемент. В частности, для получения точных результатов испытания методом РСПТ чувствительный элемент должен располагаться в центре собранного датчика цилиндрической формы, а теплоемкость пространства между чувствительным элементом и центральной осью датчика не должна быть существенной (рис. 6.11). Более того, передача тепла между чувствительным элементом и окружающей датчик средой должна происходить в основном в одном направлении (по радиусу), как это показано на рис. 6.12.

В главе 4 были представлены рентгеновские снимки типовых ТДС ядерного класса. Эти снимки были сделаны, когда проводилась разработка метода РСПТ, с целью проверить справедливость предположений, указанных выше. Позже было установлено, что справедливость предположений РСПТ лучше всего проверяется в лабораторных экспериментах, т.е., для того чтобы время реакции датчика определенной конструкции можно было измерять без демонтажа, используя метод РСПТ, представительный образец датчика с подходящим ему термоканалом (если таковой используется) должен быть испытан в лаборатории. В этих лабораторных испытаниях следует использовать метод погружения для измерения времени реакции датчика, а затем провести испытание датчика методом РСПТ при тех же условиях. Эта процедура должна показать, что оба метода дают сравнимые результаты. В частности, было установлено, что если результаты метода погружения и РСПТ отличаются друг от друга не более, чем на 10%, то датчик

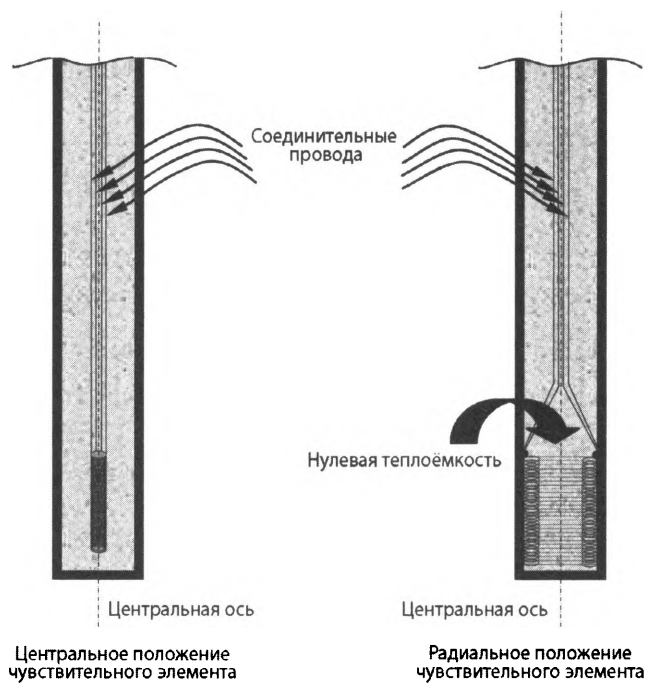


Рис. 6.11. Центрально-осевая конфигурация чувствительных элементов

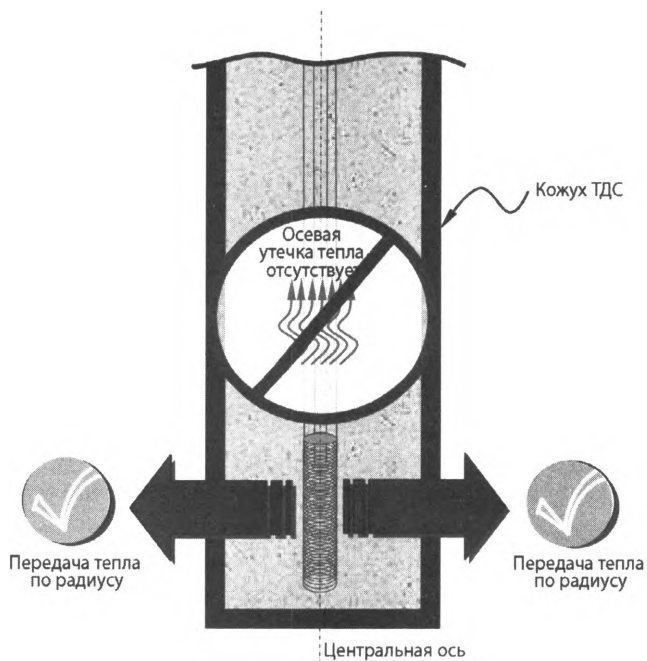


Рис. 6.12. Иллюстрация радиальной передачи тепла от чувствительного элемента ТДС

отвечает условиям справедливости предположений РСПТ, и его обозначают как «допускающий проверку методом РСПТ».

6.3.4. Валидация метода РСПТ для ТДС

Валидация метода РСПТ была проверена для нескольких моделей ТДС, используемых на АЭС. Когда в конце 1970-х годов метод РСПТ был разработан, его применимость была подтверждена для ТДС фирмы Rosemount (таблица 6.5), которые в основном использовались в то время на реакторах PWR американского производства для измерения температур теплоносителя. С тех пор фирма Rosemount постепенно уменьшала свое присутствие на рынке приборов для измерений температуры на АЭС, относящихся к системам безопасности, и появились новые фирмы-изготовители. В настоящее время, например, ТДС ядерного класса поставляют для промышленности компании Weed Instruments Company и RdF Corporation в США; компания Sensyscon и другие в Европе. Многие из поставляемых датчиков были проверены на применимость к ним метода РСПТ, соответствующие результаты испытаний представлены в таблицах 6.6 и 6.7. В каждую таблицу включены данные по времени реакции ТДС, измеренному вначале методом погружения, а затем методом РСПТ в тех же условиях. Как измерения методом погружения, так и проверка датчиков методом РСПТ на применимость этого метода проводились во вращающемся баке с водой комнатной температуры и скоростью воды относительно датчика, равной 1 м/с.

При разработке метода РСПТ помимо лабораторных проводились испытания на применимость в условиях рабочего режима реакторов PWR. Эти исследования были выполнены в конце 1970-х годов автором данной книги и его французскими коллегами в лаборатории Les Renardieres компании EdF, а также в лаборатории Сакле КАЭ Франции [13]. В этой работе использовались применявшиеся на реакторах типа PWR типичные модели ТДС фирмы Rosemount. Главные исследования проводились на установках компании EdF в лаборатории Les Renardieres на петле, воспроизводящей рабочий режим станции с реактором PWR. В частности, петля эксплуатировалась при температуре около 300°C, давлении 150 бар (15 000 кПа) и скорости теплоносителя около 10 м/с. В то время компания EdF использовала петлю для испытания таких компонентов реактора, как насосы и задвижки, а для проведения проверки метода РСПТ для петли была спроектирована испытательная секция, см. рис. 6.13. ТДС помещались в петлю для испытаний по одинокке; время реакции датчика измерялось при помощи ступенчатого изменения температуры воды в петле. Компания EdF спроектировала

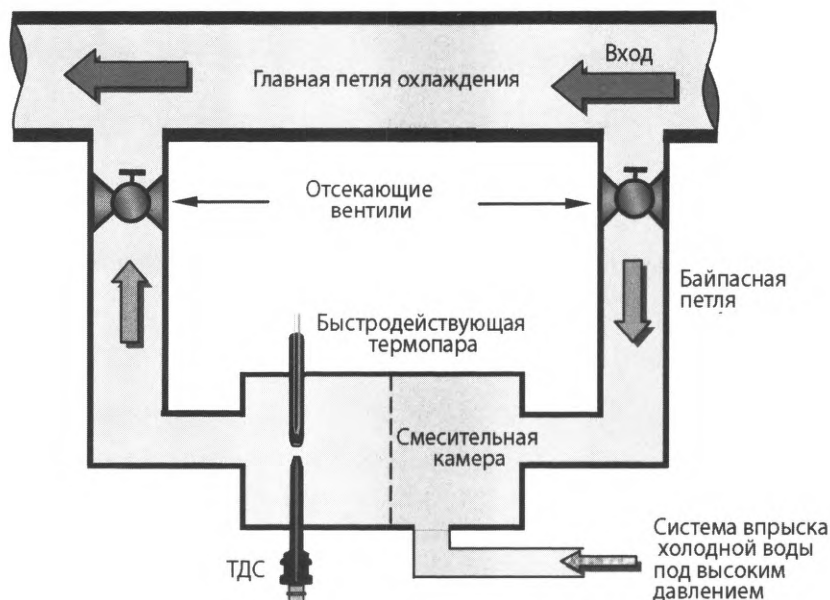


Рис. 6.13. Упрощенная схема петли компании EdF для валидации метода РСПТ

систему инъекции холодной воды для получения ступенчатого изменения температуры в условиях высокой температуры, давления и скорости воды в петле. Для получения сигнала времени, необходимого для измерений времени реакции ТДС, в трубопроводе петли напротив ТДС была установлена термопара, так чтобы ее концевая часть была рядом с концевой частью чувствительного элемента ТДС.

Время реакции каждого ТДС в том виде, как он устанавливался в петлю, сначала определялось путем фиксации времени, которое было необходимо для достижения сигналом датчика 63,2% от своего окончательного установившегося значения, начиная с момента, когда инъекция в петлю холодной воды приводила к ступенчатому изменению температуры. Затем ТДС испытывался при тех же условиях при помощи метода РСПТ и полученные данные анализировались с целью получить время реакции датчика. Наглядные результаты этих испытаний представлены в таблице 6.8, а на рис. 6.14 и 6.15 показаны фотографии петли EdF.

6.3.5. Валидация метода РСПТ для термопар

Применимость метода РСПТ была также доказана для термопар в лабораторных испытаниях с потоком воды и воздуха [15, 16]. В таблицах 6.9 и 6.10 приводятся наглядные результаты этих испытаний с использованием той же процедуры, что и для испытаний РСПТ для ТДС.

Таблица 6.5. Результаты лабораторной валидации метода РСПТ для ТДС фирмы Rosemount

	Модель ТДС	Внешний диаметр чехла (мм)	Внешний диаметр термоканала (мм)	Время реакции (секунды)		Количество чувствительных элементов	Количество соединительных проводов	R ₀ (Ом)
				Метод погружения	Метод РСПТ			
1	176 KF	9,5	TK нет	0,38	0,40	1	4	200
2	104 ADA	3,2	6,4	7,1	7,2	1	2 + холостой	200
3	104 ADA без TK	3,2	TK нет	3,1	3,1	1	2 + холостой	200
4	104 VC	3,2	6,4	5,3	5,5	1	2 + холостой	200
5	104 VC без TK	3,2	TK нет	2,3	2,1	1	2 + холостой	200
6	177 GY	8,5	TK нет	6,1	6,3	2	8 (4 на каждый элемент)	100
7	177 HW	7,4	10,4	11,7	12,3	2	8 (4 на каждый элемент)	100
8	104 AFC	6,1	9,6	5,3	5,2	1	2 + холостой	200
9	104 AFC без TK	6,1	TK нет	3,0	3,1	1	2 + холостой	200
10	104 AFC с комп. NEVER-SEEZ	6,1	9,6	3,9	3,9	1	2 + холостой	200

Примечания:

1. Источник данных: Доклад EPRI NRP-1486
2. Все испытания проводились в воде комнатной температуры при скорости 1м/с.
3. TK = термоканал
4. Размеры округлены.
5. Компаунд NEVER-SEEZ улучшает тепловой контакт и иногда применяется внутри концевой части датчика для улучшения времени реакции.
6. R₀ — см. уравнение (5.10)

Таблица 6.6. Результаты лабораторной валидации метода РСПТ для ТДС фирмы Weed

	Модель ТДС	Внешний диаметр чехла (мм)	Внешний диаметр термоканала (мм)	Время реакции (секунды)		Количество чувствительных элементов	Количество соединительных проводов	R ₀ (Ом)
				Метод погружения	Метод РСПТ			
1	N9004	6,4	9,5	2,9	2,8	1 или 2	4 или 8	200
2	N9004 без ТК	6,4	ТК нет	1,6	1,7	1 или 2	4 или 8	200
3	N9019	9,5	ТК нет	2,9	2,8	1 или 2	4 или 8	200
4	SP612	6,4	9,5	4,1	3,9	1 или 2	4 или 8	200

Примечания:

1. Все испытания проводились в воде комнатной температуры со скоростью 1м/с.
2. ТК = термоканал
3. Размеры округлены.
4. ТДС фирмы Weed поставляются как с одиночным, так и с двойным чувствительным элементом и числом соединительных проводов равным 4 или 8, соответственно.
5. R₀ — см. уравнение (5.10)

Таблица 6.7. Результаты лабораторной валидации метода РСПТ для ТДС фирмы RdF

	Модель ТДС	Внешний диаметр чехла (мм)	Внешний диаметр термоканала (мм)	Время реакции (секунды)		Количество чувствительных элементов	Количество соединительных проводов	R ₀ (Ом)
				Метод погружения	Метод РСПТ			
1	21204 без ТК	9,5	ТК нет	2,0	2,1	1	4	200
2	21232	6,4	9,5	4,9	5,0	1	4	200
3	21232 без ТК	6,4	ТК нет	0,9	1,0	1	4	200
4	21458	6,4	9,5	5,1	5,2	1	4	200
5	21458 без ТК	6,4	ТК нет	1,8	1,9	1	4	200
6	21459	6,4	9,5	4,9	5,2	2	8	200
7	21459 без ТК	6,4	ТК нет	2,0	2,2	2	8	200

Примечания:

1. Все испытания проводились в воде комнатной температуры при скорости 1 м/с.
2. ТК = термоканал
3. Размеры округлены.
4. ТДС фирмы RdF поставляются как с одиночным, так и с двойным чувствительным элементом и числом соединительных проводов равным 4 или 8, соответственно.
5. ТДС модели 21204 являются датчиками прямого погружения.
6. R₀ — см. уравнение (5.10)

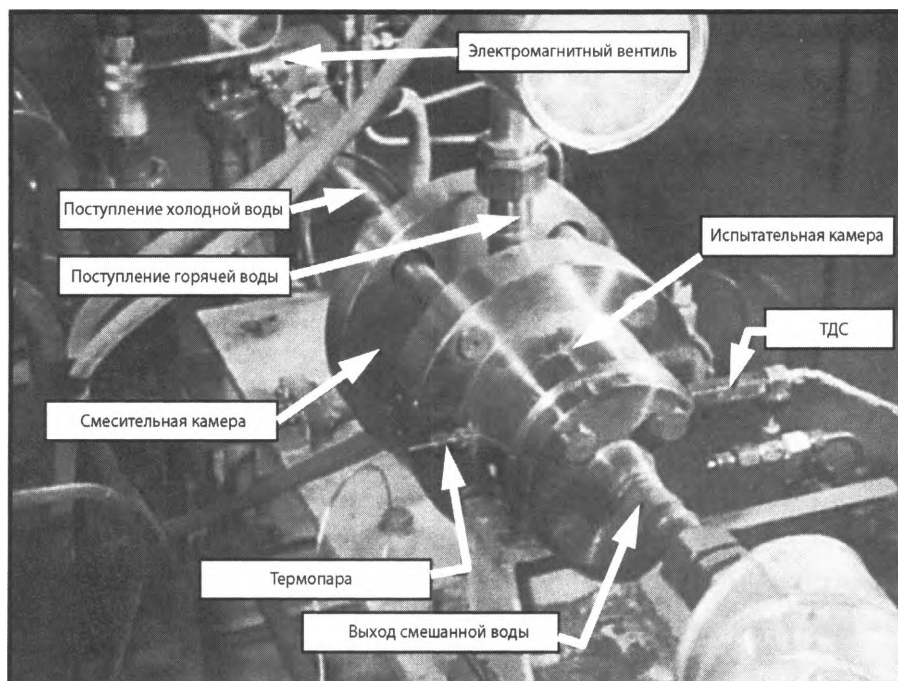


Рис. 6.14. Установка ТДС и термопары в петле EdF

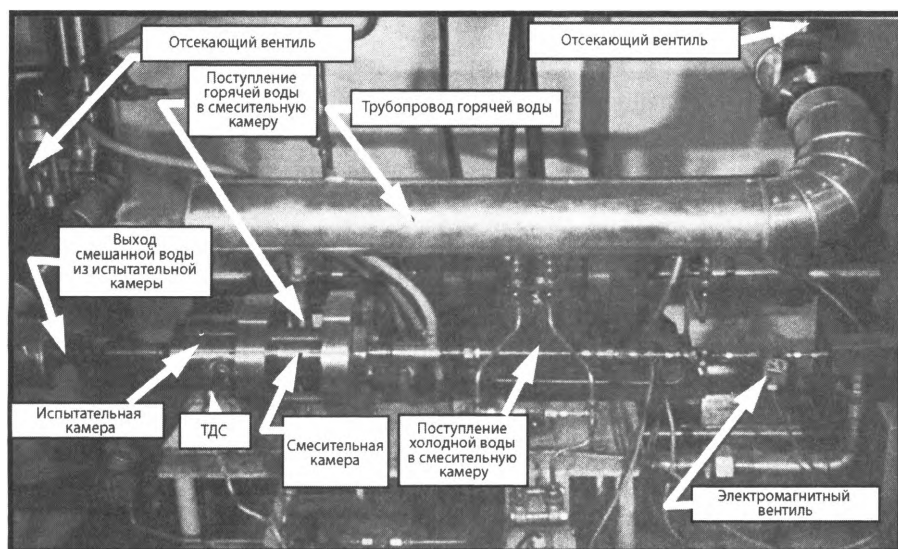


Рис. 6.15. Испытательная секция петли EdF для валидации метода РСРТ

Таблица 6.8. Результаты валидации метода РСПТ для ТДС фирмы Rosemount в условиях рабочего режима реактора типа PWR, полученные на петле EdF

Модель ТДС	Время реакции (секунды)	
	Прямые измерения	Метод РСПТ
176KF	0,14	0,13
177HW	8,8	8,4
104-AFC	6,2	5,9
104-AFC с компаундом NEVER-SEEZ	4,1	3,7

Источник данных: Доклад EPRI № NP-1486

Таблица 6.9. Результаты валидации метода РСПТ для термопар при испытаниях в потоке воды

Модель ТДС	Время реакции (секунды)	
	Метод погружения	Метод РСПТ
29	1,40	1,10
27	2,00	1,99
43	0,37	0,37
44	2,10	2,19
46	1,98	2,39
36	1,43	1,33
38	1,90	1,98
40	0,43	0,43
04	3,06	2,83
07	2,72	2,96
09	0,76	0,49
13	0,27	0,29

Результаты получены в лаборатории с водой комнатной температуры и скоростью потока 1 м/с

Время реакции термопар обычно не проверяют на АЭС, потому что для этих датчиков время реакции не является настолько важным параметром, как для ТДС. Скорее метод РСПТ применяют для испытания термопар на исправность, проверки отсутствия деградации их свойств из-за старения, чтобы отделить неисправность кабеля от неисправностей датчика, для поиска причин отказа и для проверки правильности установки термопар в термоданалы. Например, в реакторах PWR российской конструкции (реакторах ВВЭР) метод РСПТ был использован для определения того, достигали ли термопары при монтаже конца своих термоданалов: в этих реакторах термопары устанавливаются в длинные

Таблица 6.10. Результаты валидации метода РСПТ для термопар при испытаниях в потоке воздуха

Номер термопары	Время реакции (секунды)	
	Метод погружения	Метод РСПТ
40	3,20	3,63
38	9,90	9,48
52	1,28	1,54
13	3,66	7,03
09	10,03	14,68
07	17,13	18,27
51	1,12	1,10
43	3,88	3,90
29	10,55	8,61
27	17,10	19,45
20	0,16	0,10
18	0,14	0,12
23	0,50	0,56

Результаты получены в лаборатории в воздушной петле при скорости потока 5 м/с

термоканалы (от 10 до 20 м) в различных точках внутри активной зоны. При помощи метода РСПТ на реакторах ВВЭР удалось верифицировать правильность монтажа термопар.

6.3.6. Оптимизация параметров метода РСПТ

Точность результатов метода РСПТ зависит от того, насколько датчик удовлетворяет тем предположениям, от которых зависит применимость метода, а также от параметров, при которых собираются и анализируются данные. Например, время отбора одного элемента данных для проверки времени реакции ТДС на АЭС обычно составляет от 0,001 до 0,04 секунды, в зависимости от типа ТДС и условий тестирования. Более того, чтобы при проверке методом РСПТ были получены точные результаты, важно правильно установить размер выборки. В зависимости от ТДС и условий его испытания обычно отбирают от 1000 до 2000 элементов данных. Произведение времени получения одного элемента данных на размер выборки дает время получения комплекта данных РСПТ, которое в условиях работающей АЭС обычно варьируется от 5 с для датчиков прямого погружения до примерно 50 с для датчиков с термоканалами.

Помимо оптимизации скорости и времени сбора данных для каждой конструкции ТДС должны быть также оптимизированы параметры

анализа РСПТ, т.е. переменные величины, которые используют в итерационном процессе подгонки полученных данных под уравнение РСПТ. Итерация этих параметров происходит во время компьютерного анализа данных РСПТ до тех пор, пока разница между первичными данными и данными, удовлетворяющими уравнению РСПТ, не станет минимальной. Этот процесс, вместе с выбором наилучших параметров выборки данных, называют *оптимизацией параметров РСПТ*. В частности, оптимизация параметров РСПТ выражается в проведении полного комплекта лабораторных испытаний представительных датчиков и термоканалов (если они используются) для любой новой конструкции датчика. Эти испытания обычно включают в себя многочисленные измерения методами погружения и РСПТ при одинаковых условиях. Данные РСПТ, полученные при этом, сохраняют и затем анализируют, проводя итерационный выбор параметров их отбора и анализа. Процесс выбора параметров продолжается до тех пор, пока результаты метода РСПТ будут отличаться от результатов метода погружения на менее, чем на 10%; тогда параметры отбора и анализа данных РСПТ регистрируют в качестве оптимальных параметров РСПТ для данного датчика. Оптимальные параметры впоследствии используют как начальные параметры «по умолчанию» для проведения сбора и анализа данных РСПТ для всех датчиков, у которых конструкция соответствует той, для которой были установлены оптимальные параметры.

6.3.7. Точность результатов метода РСПТ

В общем случае, точность измерений времени реакции без демонтажа датчика, которую позволяет получить метод РСПТ, равна $\pm 10\%$ при соблюдении следующих условий: (1) применимость метода РСПТ была подтверждена для испытываемого датчика, (2) данные РСПТ не содержат чужеродных помех и зарегистрирован достаточно гладкий переходный процесс и (3) для обработки данных используются оптимальные параметры. Кроме этого, режим работы АЭС должен позволять использование метода РСПТ: температура рабочей среды должна быть стабильной и не иметь значительных флуктуаций или дрейфа во время проведения испытаний.

При проверке методом РСПТ выявлена возможность трех типов ошибок: (1) ошибки, возникающие из-за того, что для конструкции испытываемого датчика не выполняются предположения, при которых справедливы преобразования РСПТ, (2) ошибки определения правильных величин модальных постоянных времени и (3) ошибки, допущенные при отборе и анализе данных. Ниже рассматривается отдельно каждый из этих видов ошибки.

Ошибки из-за несоблюдения предположений РСПТ

Преобразование РСПТ предполагает, что передаточная функция датчика не имеет нулей. Это предположение справедливо при двух условиях, касающихся положения чувствительного элемента в концевой части датчика: (1) тепло, выделяемое в датчике во время тестирования методом РСПТ, передается наружу по радиальному направлению (существует слабая осевая утечка тепла или ее нет вообще); (2) между чувствительным элементом и центральной осью датчика нет компонентов со значительной теплоемкостью. Эти допущения необходимы для обеспечения одинаковой передачи тепла между чувствительным элементом и рабочей средой, окружающей датчик, как в случае метода погружения, так и РСПТ.

Чтобы быть уверенным в том, что допущения РСПТ выполняются, для каждой конструкции датчика должна быть проведена проверка применимости метода РСПТ для измерения времени реакции.

Ошибки в вычислении модальных постоянных времени

Обычно данные РСПТ позволяют определить лишь две модальные постоянные времени (τ_1 и τ_2), при этом эти две константы должны быть определены с достаточной точностью, чтобы получить правильное значение полного времени реакции датчика (τ).

Правильному определению τ_1 и τ_2 могут помешать два вида ошибок: (1) шум сигнала, который возникает либо из-за электрических наводок (высокочастотный шум), либо из-за флуктуаций технологического процесса (низкочастотный шум); (2) дрейф температуры технологического процесса. Проблемы с шумом можно преодолеть, повышая силу тока для нагрева датчика и (или) усредняя многократно получаемые наборы данных РСПТ. На некоторых станциях удовлетворительное отношение сигнала к шуму получают при использовании умеренных значений силы нагревающего тока (например, от 30 до 50 мА), на других станциях с высоким уровнем шума, нельзя ограничиться умеренными значениями тока; в этих случаях, помимо использования самой высокой разрешенной силы тока (т.е., 50 мА), испытание РСПТ повторяют до 50 раз и результаты усредняют, чтобы свести к минимуму влияние шума процесса на данные РСПТ.

От дрейфа легко освободиться используя простое программное обеспечение, которое определяет скорость дрейфа и вычитает ее из собранных данных. Если дрейф данных РСПТ положителен (данные «дрейфуют»

в сторону увеличения температуры), то результаты РСПТ имеют тенденцию завышать время реакции датчика по сравнению с его реальным значением, а если дрейф данных отрицателен (они меняются в сторону уменьшения), то результаты РСПТ покажут более быструю реакцию датчика, чем его истинное время реакции.

Ошибки при сборе данных и их анализе

Причиной ошибок при сборе и анализе данных являются: (1) неправильно выбранные параметры выборки и анализа, применяющиеся при сборе и анализе данных РСПТ, и (2) ограниченное разрешение при сборе данных и проведении компьютерных расчетов. Чтобы избежать ошибок из-за параметров выборки данных следует пользоваться следующим правилом: скорость отбора данных должна быть по крайней мере в 100 или 1000 раз выше, чем ожидаемое время реакции датчика (например, 0,02 секунды для датчика с временем реакции 4 с), и повторять испытания РСПТ столько, сколько надо (например, от 10 до 50 повторов, в зависимости от величины флуктуаций температуры) для получения гладкой кривой переходного процесса РСПТ при помощи группового усреднения. Чтобы не допускать ошибок из-за неверных аналитических параметров, следует использовать те оптимальные значения, которые были установлены для датчика, как описано в разделе 6.3.6.

Ограниченная разрешающая способность при сборе данных и выполнении компьютерных расчетов неизбежна, если принять во внимание существующий уровень развития метода. Ситуация будет улучшаться по мере дальнейшего развития технологии получения данных и их анализа.

6.3.8. Влияние тока нагрева датчика

При измерении сопротивления температурных датчиков, таких как ТДС, используемых на АЭС, через них обычно пропускается ток в несколько миллиампер (например, от 1 до 2 мА). Изготовители ТДС иногда указывают максимально допустимые значения силы тока, который может использоваться прежде, чем самонагрев датчика приведет к значительным ошибкам измерения температуры. Обычно максимально рекомендуемое значение составляет 10 мА, при этом ошибка измерений будет равна примерно от 0,5 до 1 °С для типичного ТДС, используемого на АЭС с реактором PWR. Однако на практике значение силы тока, применяемого для измерения сопротивления, составляет примерно 1 мА, что приводит к пренебрежимо малым ошибкам.

При разработке метода РСПТ к нескольким изготовителям ТДС ядерного класса обратились с просьбой исследовать вопрос о максимально

допустимой силе тока. В результате было согласовано, что при используемой для РСПТ силе тока до 80 мА датчику не причиняется никакого ущерба [2]. В дополнение к этому, в Окриджской национальной лаборатории были также получены доказательства того, что умеренный нагрев электрическим током, необходимый для метода РСПТ, не наносит ущерба ТДС. Этот вопрос изучался также в Теннессийском университете в рамках исследовательской программы, финансируемой EPRI, в которой ТДС подвергались тысячам ступенчатых изменений силы тока, достигающих 100 мА, что имитировало тысячи испытаний методом РСПТ. При этом не было отмечено никаких заметных изменений в калибровке, времени реакции и других характеристиках ТДС.

6.3.9. Влияние стратификации температуры

Стратификация температуры (которую также называют *температурной струйностью*) представляет собой явление, типичное для АЭС с реакторами PWR. Это явление возникает из-за неоднородного нагрева теплоносителя при прохождении через активную зону. В результате, в потоке воде, который выходит из зоны и поступает в трубопроводы горячих участков первичного контура, присутствуют слои теплоносителя с различной температурой. В типичном случае значения температуры воды в различных точках на внутренней окружности трубы горячего участка могут отличаться друг от друга на величину от 3 до 10 °C, в зависимости от АЭС.

Кроме стратификации, в теплоносителе иногда возникают закручивающиеся потоки, как это показано на рис. 6.16. Сочетание стратификации температуры и закручивания может привести к большим флуктуациям и неоднородности температуры, причем эти проблемы не уменьшаются по мере того, как теплоноситель продвигается по контуру охлаждения. Действительно, данная проблема часто имеет место в трубопроводах холодного участка контура, хотя и не проявляется там столь заметно, как на горячих участках.

На рис. 6.17 представлены данные мониторинга температуры для шести ТДС, установленных на горячих участках контура охлаждения реактора PWR. На графиках даны показания взаимодублируемых ТДС горячих участков, выраженные в виде отклонений показания каждого отдельного ТДС от среднего значения показаний шести датчиков. Заметно отклонение порядка ± 2 °C (т.е., в сумме 4 °C) между показаниями шести ТДС. Данные того же типа, полученные для одного из ТДС горячего участка, приведены на рис. 6.18 в виде зависимости от мощности реактора, они были получены в процессе выхода реактора на

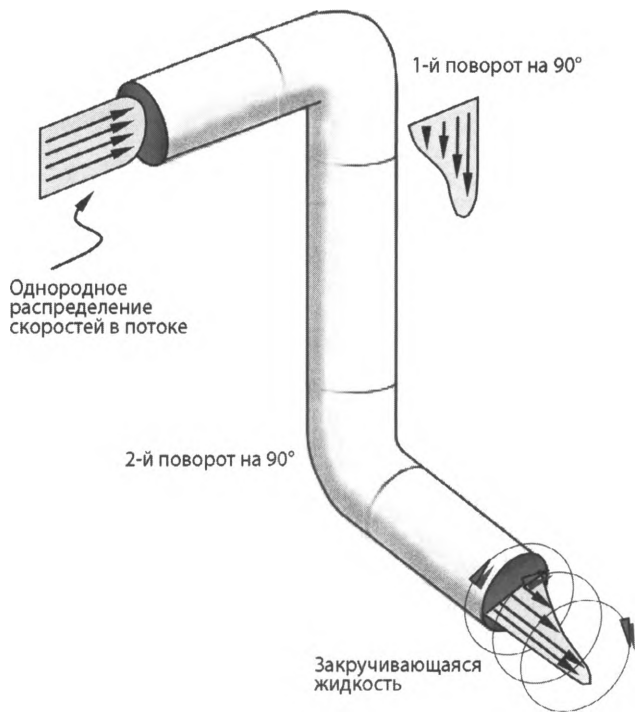


Рис. 6.16. Возможное закручивание потока теплоносителя в первичном контуре реактора PWR

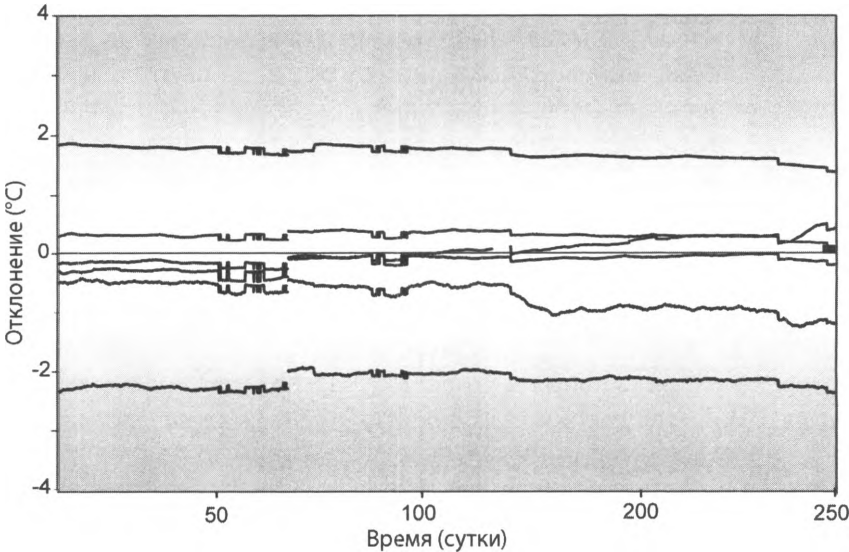


Рис. 6.17. Отклонения взаимодублируемых ТДС горячего участка из-за стратификации температуры

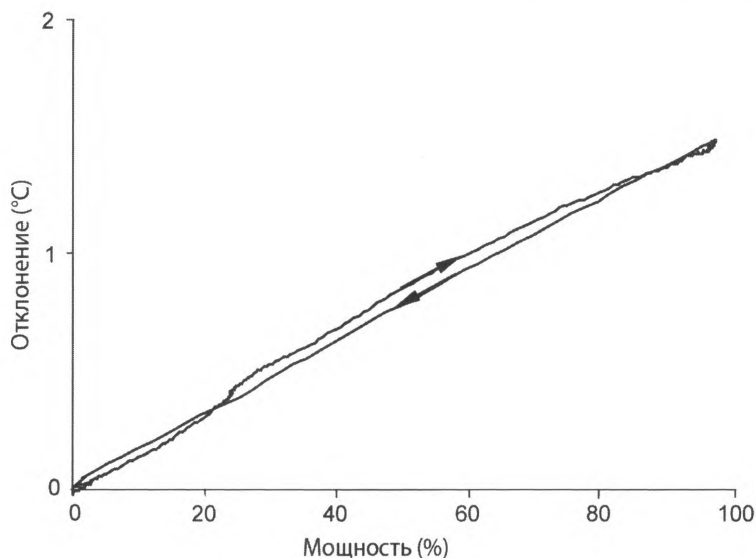


Рис. 6.18. Ошибка из-за стратификации температуры в зависимости от мощности реактора

полную мощность из холодного состояния и во время его перехода с работы на полной мощности в холодное состояние. Данные представляют отклонения показаний одного из ТДС горячего участка от среднего значения показаний всех ТДС горячего участка той же петли охлаждения, представленные в виде графика зависимости этих отклонений от мощности реактора. По мере того, как мощность возрастает от 0 до 100%, ошибка ТДС увеличивается с 0 до примерно 1,5°C и наоборот. Проблемы стратификации температуры и закручивания потока были впервые отмечены в середине 1960-х годов на первом блоке АЭС Сан Онофре в Калифорнии. На этой АЭС, ныне выведенной из эксплуатации, был установлен реактор PWR компании Вестингауз с двумя петлями охлаждения. Чтобы устранить недостатки, вызывавшиеся указанными проблемами, на АЭС были добавочно смонтированы байпасные петли и байпасные коллекторы для ТДС, как показано на рис. 6.19. После получения опыта работы переоборудованной системы на АЭС Сан Онофре почти все реакторы PWR конструкции Вестингауза были дооборудованы байпасными петлями и коллекторами для ТДС, и такие петли и коллекторы также монтировались на новых АЭС. Байпасные петли помогали обеспечить перемешивание водяного потока, уточняя таким образом измерения температуры, характеризующие весь поток теплоносителя.

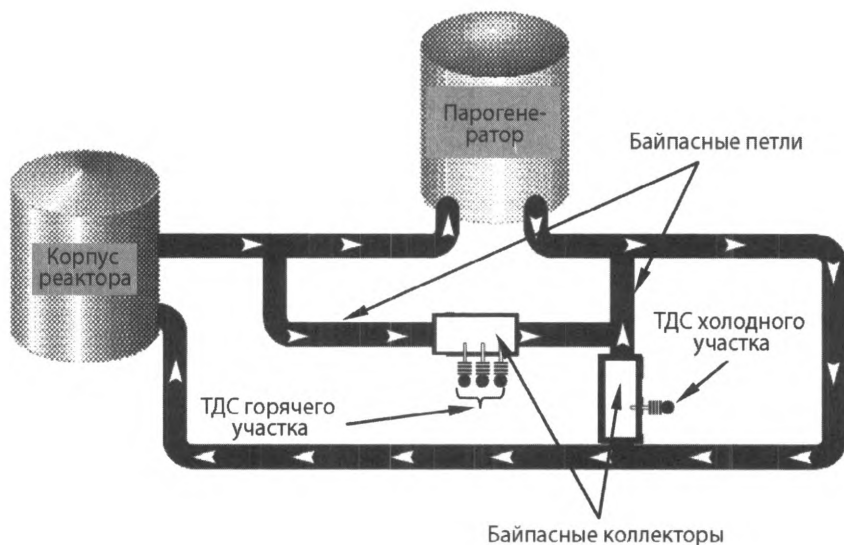


Рис. 6.19. Система первичного контура охлаждения реактора PWR с байпасным коллектором для ТДС

В каждой байпасной петле контура охлаждения реактора PWR обычно используются пробоотборники, как показано на рис. 6.20, установленные в трубопроводах системы охлаждения для отбора проб теплоносителя из различных струй внутри трубы и передачи отобранных проб через байпасные трубопроводы к коллекторам, где температура воды измеряется при помощи ТДС. Чтобы компенсировать потери времени на передачу отобранных порций теплоносителя, в байпасных коллекторах применяются ТДС прямого погружения с коротким временем реакции. Задержка на передачу проб воды, составляющая в типичном случае около двух секунд, равна времени, которое необходимо, чтобы вода из трубопроводов первичного контура прошла через байпасные петли и достигла байпасных коллекторов ТДС.

Байпасные коллекторы разрешили проблему измерений температуры, но привели к установке дополнительно еще примерно 100 метров трубопроводов и другого оборудования в системе охлаждения реактора, включая более 100 трубных кронштейнов, более 60 демпферов, от 60 до 70 задвижек и т.д. С течением времени байпасные петли и коллекторы стали вызывать проблемы при техобслуживании, приводить к повышенному облучению персонала и увеличивать вероятность вынужденных остановов АЭС. В результате, в середине 1980-х годов было решено удалить байпасные коллекторы. Таким образом, после

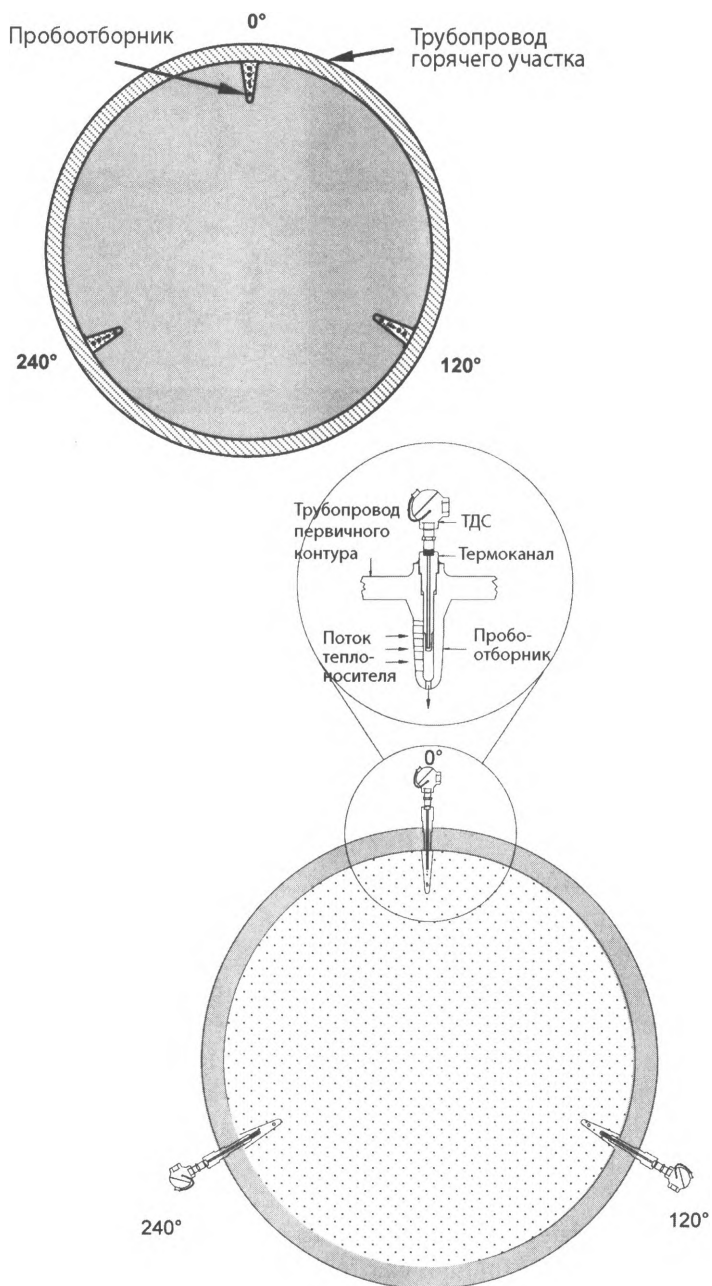


Рис. 6.20. Пробоотборники в трубопроводах первичного контура реакторов PWR

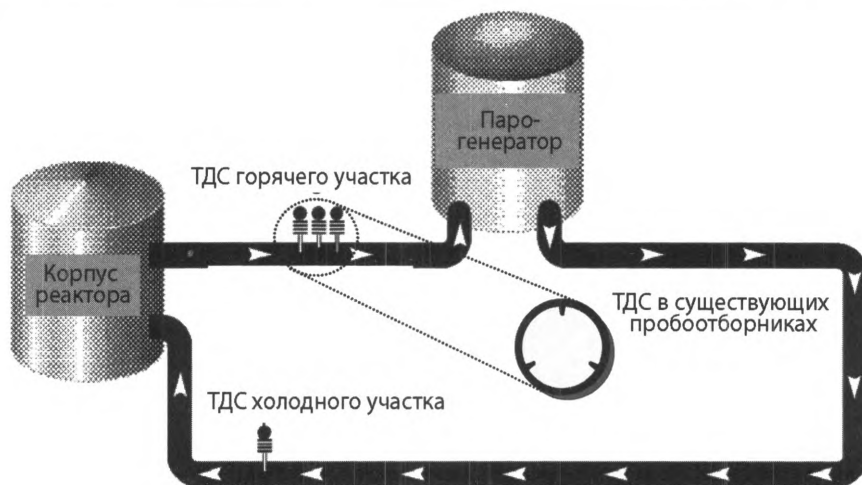


Рис. 6.21. Первичный контур охлаждения реактора PWR после удаления байпасных коллекторов ТДС

примерно 10–20 лет работы с байпасными коллекторами, на АЭС с реакторами PWR конструкции Вестингауза начали удалять байпасные коллекторы и устанавливать новые ТДС с термоканалами прямо в трубопроводы горячего и холодного участков контура охлаждения (рис. 6.21). При выполнении этой работы термоканалы для новых ТДС по возможности устанавливали внутри существующих пробоотборников (рис. 6.20).

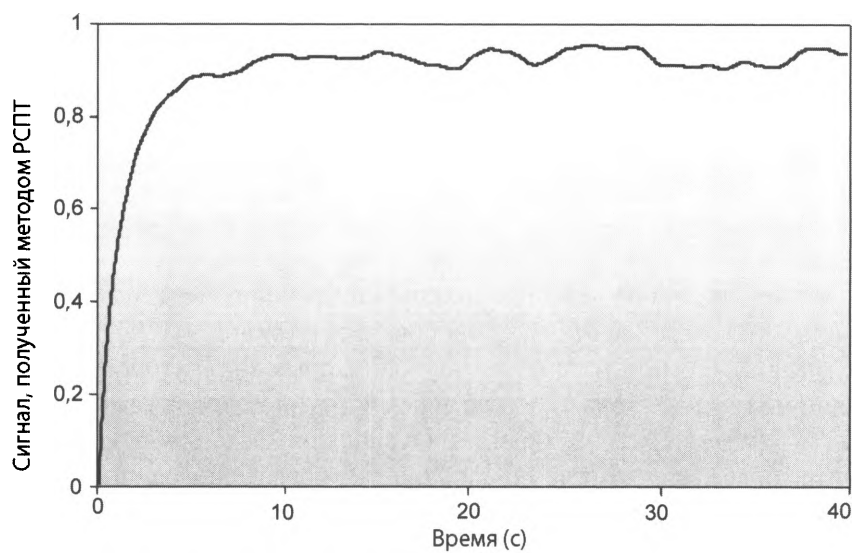
По сравнению с установкой ТДС прямого погружения в байпасные коллекторы, установка ТДС с термоканалами непосредственно в трубопроводы системы охлаждения сказывается на полном времени реакции соответствующего канала измерения температуры. В таблице 6.11 представлены данные по динамической реакции ТДС в термоканалах, установленных непосредственно в трубопроводы контура охлаждения, в сравнении с ТДС прямого погружения, установленными в байпасные коллекторы. В последнем случае для компенсации задержки во времени (две секунды), связанной с передвижением воды из трубопровода системы охлаждения до байпасного коллектора, требуется применять быстрый ТДС (время реакции 3,0 с или менее), чтобы обеспечить полное время реакции, равное 6,0 с. Задержка в 2 с уменьшается до задержки в 0,25 с (перемешивание воды в пробоотборниках), когда ТДС с термоканалами устанавливаются непосредственно в трубопровод системы охлаждения реактора.

Таблица 6.11. Пример времени реакции системы с байпасными коллекторами для ТДС и без коллекторов

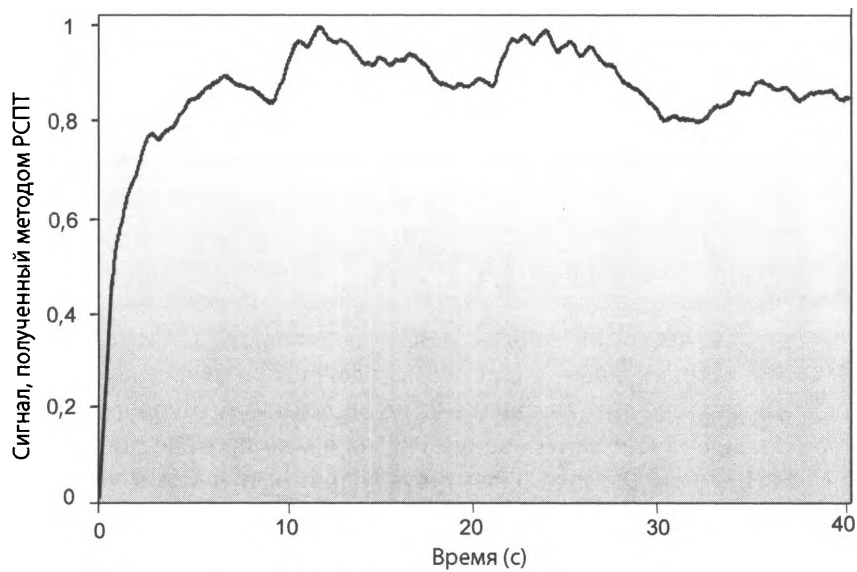
Компонент системы	Время реакции (с)	
	С коллектором	Без коллектора
ТДС	3,0	4,75
Электроника	1,0	1,0
Транспортировка/перемешивание	2,0	0,25
Полное время реакции	6,0	6,0

Помимо влияния на динамику измерений температуры, удаление байпасных коллекторов отвечает требованию к точности ТДС первичного контура. В частности, при наличии байпасных коллекторов вода перемешивается достаточно хорошо перед поступлением в эти коллекторы, и поэтому температура, характеризующая поток теплоносителя, измеряется более точно. Когда ТДС устанавливаются непосредственно в трубопроводы системы охлаждения, температуру всего потока теплоносителя можно определить, усредняя показания взаимодублируемых ТДС. Последнее измерение очевидно не так точно, как упомянутое ранее, потому что вода в пробоотборниках перемешивается не так хорошо, как в байпасных коллекторах. В результате, к калибровке ТДС с термочаналами, которые устанавливаются непосредственно в трубопроводы, предъявляются более жесткие требования. В главе 5 был описан метод перекрестной калибровки, который был разработан для проверки калибровки ТДС первичного контура на АЭС с реакторами PWR. В частности, были описаны методы обработки и анализа данных, а также внесения поправок в алгоритмы с тем, чтобы обеспечить правильность оценки точности ТДС, установленных в первичный контур.

В настоящее время на многих АЭС с реакторами PWR конструкции Вестингауза байпасные коллекторы удалены, а взаимодублируемые ТДС с термочаналами установлены по окружности трубопроводов контура охлаждения. Эти изменения сказались на проведении тестирования ТДС методом РСРТ, так как флуктуации температуры из-за стратификации и закручивания потока в системе охлаждения влияют на данные РСРТ. На рис. 6.22 показаны данные РСРТ от ТДС, работающего на АЭС в нормальных условиях и в условиях, где стратификация температуры и закручивание потока вызывают флуктуации (шумы) в данных. Величина флуктуаций зависит от конкретной АЭС: на некоторых АЭС наблюдаются большие флуктуации температуры, а на других — очень малые. Иногда один и тот же ТДС на одной и той же станции подвержен



а) Нормальный переходной процесс РСПТ



б) Переходной процесс РСПТ с шумами

Рис. 6.22. Влияние стратификации температуры на данные РСПТ

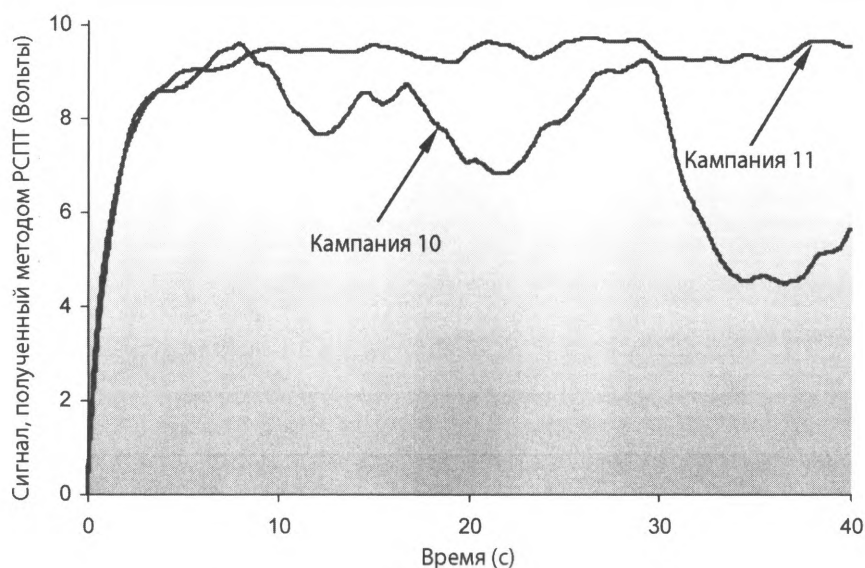


Рис. 6.23. Переходный процесс РСПТ для ТДС во время двух разных кампаний реактора

этим проблемам во время одной кампании реактора, но не страдает от них во время другой (рис. 6.23). В других случаях, в двух петлях одной и той же АЭС проблема шума данных возникает для ТДС разной ориентации, как это показано на рис. 6.24.

Конечно, данная проблема должна быть разрешена, чтобы метод РСПТ мог давать надежные результаты по проверке времени реакции датчиков. Возможны два решения проблемы: (1) повторять тестирование РСПТ многократно (до 50 раз) и усреднять результаты или (2) проводить испытания методом РСПТ в условиях «горячего резерва» во время выхода АЭС на мощность, когда температура теплоносителя на станции стабильна и максимально близка к обычной температуре рабочего режима.

На рис. 6.25 приведен вид экрана компьютерной системы сбора и обработки данных по методу РСПТ, на котором показаны 40 отдельных переходных процессов РСПТ и кривая, полученная усреднением этих процессов. Очевидно, что усредненный переходный процесс не содержит шума и позволит получить надежный результат измерения времени реакции, в то время как отдельные переходные процессы «зашумлены» и не подходят для анализа РСПТ. Представленные данные были получены на АЭС с высоким уровнем шумов из-за стратификации температуры.

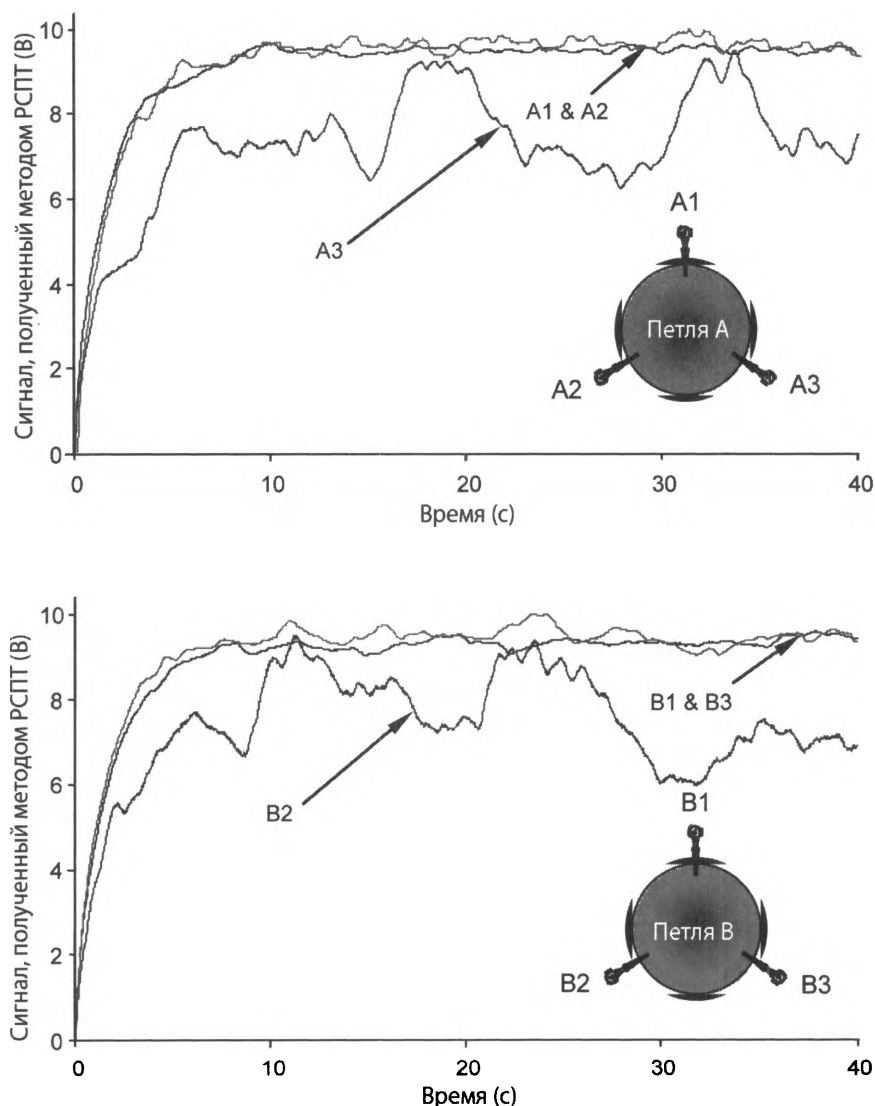


Рис. 6.24. Влияние стратификации температуры на данные РСПТ в зависимости от ориентации ТДС в трубопроводе

6.3.10. Применение метода РСПТ в режиме холодного останова АЭС

Для получения времени реакции датчика, которое соответствует условиям его работы, необходимо испытать датчик при нормальных рабочих температуре, давлении и скорости среды или при параметрах, близких к ним, для чего АЭС должна находиться в режиме работы на мощности или в условиях «горячей» готовности. Когда на станции устанавливаются

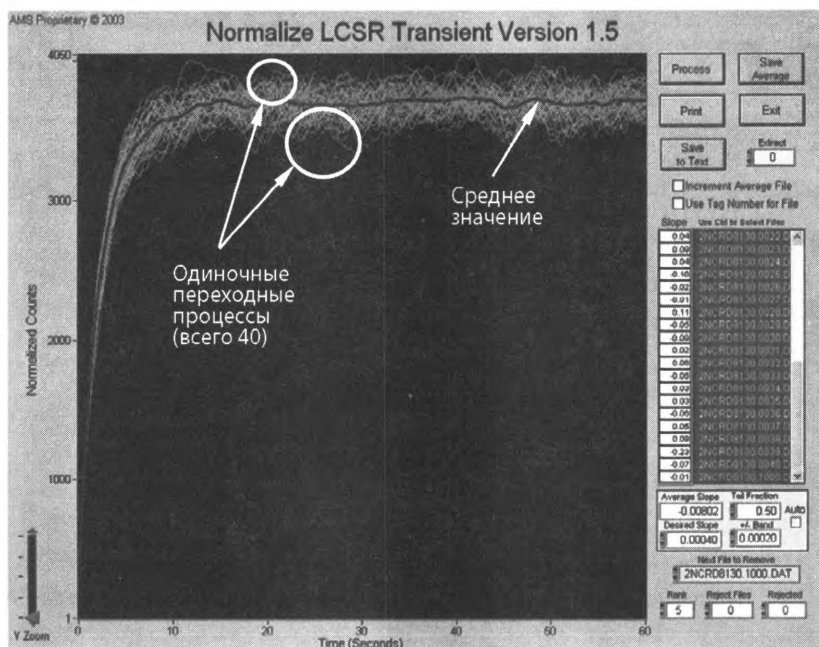


Рис. 6.25. Вид экрана с данными РСПТ для отдельных переходных процессов и кривой, усредняющей эти переходные процессы

новые датчики, нельзя определить их время реакции для рабочего режима до тех пор, пока АЭС не придет в состояние «горячей» готовности или приблизится к нему, либо когда станция начнет работу на мощности. Если в это время новый датчик не будет удовлетворять требованиям к его времени реакции, то возможно станцию придется останавливать для замены ТДС. Чтобы свести до минимума такую возможность, можно провести испытание новых датчиков методом РСПТ в условиях холодного останова АЭС, при этом целью является не измерение времени реакции, а проверка того, что ТДС установлен должным образом, обеспечивающим оптимальное время реакции.

Тестирование ТДС в режиме холодного останова проводится для группы датчиков, и полученные результаты сравниваются между собой, чтобы выявить выбросы. Если обнаруживается выброс, то ТДС снимают, очищают, поворачивают и вновь устанавливают в соответствии с требованиями. Термоканал датчика также очищают и удаляют из него какие-либо инородные тела. Затем проверка методом РСПТ повторяется, чтобы убедиться в разрешении проблемы. Если проблему решить, как указано выше, не удастся, то ТДС следует заменить. В редких случаях для решения проблемы приходится заменять термоканал.

В таблице 6.12 представлены результаты РСПТ для испытаний ТДС в режиме холодного останова на различных АЭС, а также указаны действия, которые помогли восстановить время реакции датчиков. Результаты в таблице 6.12 включают как первичные значения времен реакции, так и те, которых удалось добиться после окончательной установки датчика на место. Первичные времена реакции были определены методом РСПТ после того, как новые ТДС были установлены, а окончательные значения определены в повторных испытаниях РСПТ после того, как были предприняты действия по решению проблемы неудовлетворительного времени реакции. Отметим, что в большинстве случаев для этого было достаточно провести очистку ТДС и лишь в очень небольшом числе случаев потребовалась замена датчика. В одном случае проблеме не удалось решить очисткой или заменой ТДС, в результате пришлось заменить термоканал.

Таблица 6.12. Проблемы со временем реакции ТДС, которые были решены после испытаний в режиме холодного останова АЭС

Время реакции (с)		Действия, предпринятые для решения проблемы
Первичное	Окончательное	
11,6	4,7	Очищен термоканал
22,5	7,5	Очищен термоканал
14,7	5,9	Очищен термоканал
37,4	13,0	Очищен термоканал
9,0	5,0	ТДС установлен повторно
18,0	14,0	ТДС установлен повторно
19,2	9,5	ТДС установлен повторно
14,5	5,4	Установлен другой ТДС
24,0	7,8	Установлен другой ТДС
24,0	17,0	Удалены чужеродные тела
27,9	5,8	Заменен термоканал

6.4. Испытание методом самонагрева

Испытание самонагревом проводят для обнаружения значительных изменений во времени реакции датчика. Оно применимо только для ТДС и не применимо для термопар.

Точное время реакции ТДС методом самонагрева не измеряют: этот метод является лишь качественным способом обнаружить значительное ухудшение времени реакции датчика. Обычно ТДС испытывают как по

методу РСПТ, так и по методу самонагрева, потому что оба метода взаимно дополняют друг друга, позволяя составить более полную картину динамического поведения датчика, причем совместные испытания датчиков с применением этих методов проводятся как в условиях горячей готовности или в рабочем режиме АЭС, так и в условиях холодного останова станции, когда проверяется установка ТДС.

6.4.1. Описание метода

Подобно методу РСПТ, испытание самонагревом основано на нагреве ТДС небольшим постоянным током (I). Его проводят, используя тот же самый мост сопротивлений Уитстона, что и в методе РСПТ. Для испытания самонагревом измеряют прирост (ΔR) сопротивления ТДС в зависимости от подаваемой на датчик электрической мощности ($P = I^2 R$). В результате определяют коэффициент самонагрева (КСН) для ТДС, выражающийся в единицах Ом/Вт. Приводимые ниже выкладки показывают связь между КСН датчика и его временем реакции (τ). С целью упрощения описывается система первого порядка, хотя обычно динамическая характеристика ТДС не выражается динамической системой первого порядка. Соотношение между температурой и мощностью $I^2 R$, выделяющейся в ТДС, описывается для установившегося режима следующим уравнением:

$$Q = UA(T - \theta) \quad (6.10)$$

где:

Q – количество тепла, выделяющегося в ТДС от нагрева мощностью $I^2 R$;

U – суммарный коэффициент теплопередачи на концевом участке чувствительного элемента ТДС (включает теплопередачу как внутри, так и на поверхности датчика);

A – теплопередающая площадь;

T – температура ТДС.

θ – температура среды, в которой находится ТДС.

Для постоянной температуры среды уравнение 6.10 может быть записано следующим образом:

$$\Delta Q = UA \Delta T \quad (6.11)$$

Поэтому рост температуры в ответ на единицу прироста мощности, выделяемой в ТДС, составит:

$$\frac{\Delta T}{\Delta Q} = \frac{1}{UA} \quad (6.12)$$

Сопротивление платинового элемента ТДС приблизительно пропорционально его температуре (т.е. $\Delta R = \alpha \Delta T$, где α есть температурный коэффициент сопротивления).

Итак,

$$\frac{\Delta R}{\Delta Q} = \frac{\text{Константа}}{UA} \quad (6.13)$$

С другой стороны, время реакции приблизительно описывается следующим уравнением, предполагая, что ТДС является системой первого порядка (заметим, что обычно ТДС таковой не является):

$$\tau = \frac{MC}{UA} \quad (6.14)$$

где:

M – масса концевой части датчика, где находится чувствительный элемент

C – удельная теплоемкость материала датчика.

Если удельная теплоемкость (C) является постоянной величиной, то можно записать:

$$\tau = \frac{\text{Константа}}{UA} \quad (6.15)$$

Сравнивая уравнения 6.13 и 6.15, заключаем, что τ пропорционально $\Delta R / \Delta Q$, а так как $\Delta R / \Delta Q = KCH$, то:

$$\tau \propto \frac{\Delta R}{\Delta Q} \text{ или } \tau \propto KCH \quad (6.16)$$

где знак $\propto$ означает пропорциональную зависимость.

Из этой пропорциональной зависимости следует, что изменение времени реакции ТДС можно обнаружить по изменению величины KCH .

6.4.2. Процедура испытания

Испытание по методу самонагрева обычно проводят, используя мост Уитстона в соответствии со следующей процедурой:

1. Мост Уитстона уравнивают, затем регистрируют сопротивление ТДС. Силу тока при этом устанавливают в промежутке от 1 до 2 мА.

2. Переключатель устанавливают в положение, соответствующее большой силе тока, обычно составляющей на данной стадии испытания около 5 мА.
3. Ждут, пока установится стабильное значение сопротивления ТДС.
4. Мост уравнивают и измеряют новую величину сопротивления ТДС.
5. Данные заносят в таблицу, где сопротивление ТДС указывается в Омах, сила тока, протекающего через ТДС, в мА, а мощность, выделяемая в чувствительном элементе, в мВт (см. таблицу 6.13).
6. Ток увеличивают на величину от 5 до 10 мА и повторяют процедуру, начиная с п. 3 до тех пор, пока не будут зарегистрированы по крайней мере четыре значения сопротивления, для которых значения силы тока лежат в достаточно широком диапазоне (например, от 5 мА до 50 мА).
7. В прямоугольных координатах строят график полученных данных в виде зависимости сопротивления ТДС (R) от мощности (P). Этот график носит название *кривой самонагрева* (см. рис. 6.26).
8. Подбирают прямую линию, проходящую через нанесенные на график точки данных самонагрева, и вычисляют наклон этой прямой. Этот наклон и есть КСН.

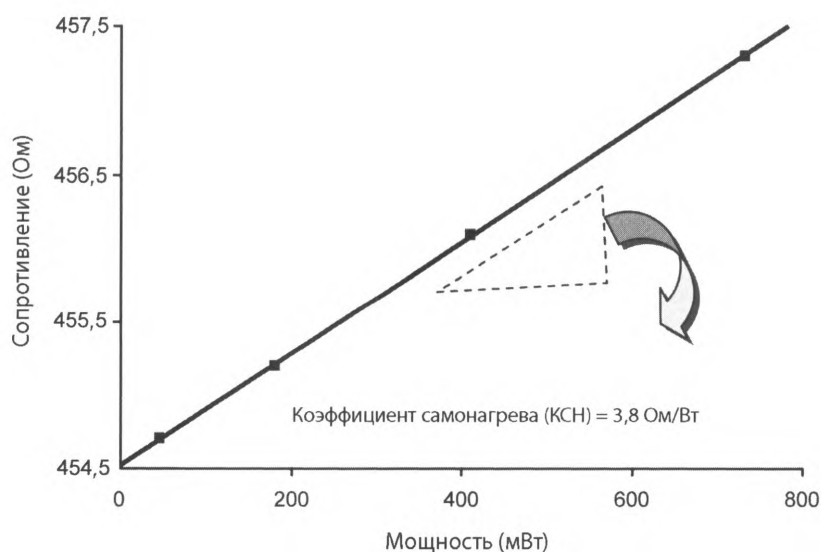


Рис. 6.26. Типичная кривая самонагрева ТДС, полученная при испытаниях на АЭС с реактором PWR

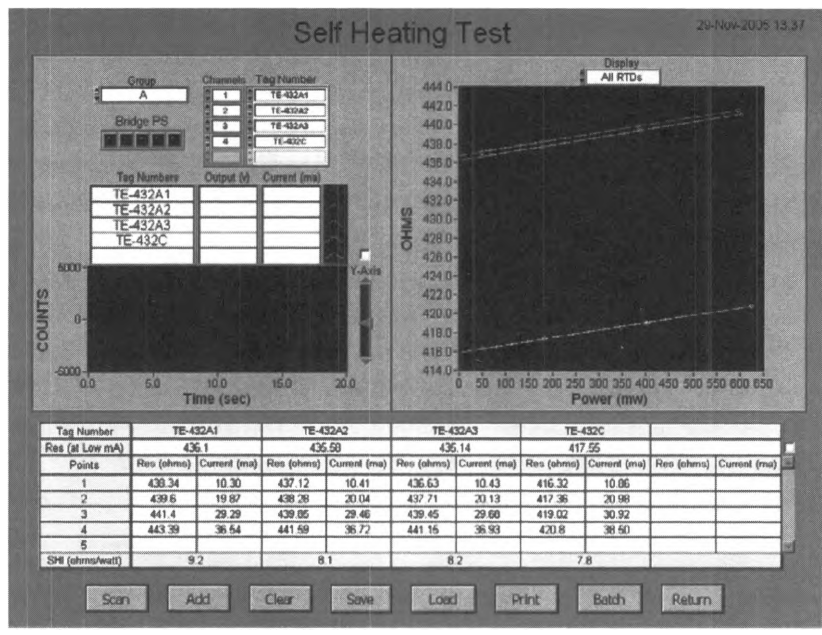


Рис. 6.27. Вид экрана компьютера с результатами испытания методом самонагрева

Описанная выше процедура автоматизирована, и компьютерная программа проводит вычисления, строит кривую самонагрева, определяет КСН, выдает результаты и сохраняет данные для исследования тенденции. На рис. 6.27 показан вид компьютерного экрана, на который выдаются результаты испытания самонагревом.

Таблица 6.13. Данные испытания по методу самонагрева

Точка данных	R Сопротивление (Ом)	I Ток (мА)	P Мощность (мВт)
1	442,72	10,72	50,88
2	443,88	20,61	188,55
3	445,84	29,99	400,99
4	447,72	37,09	615,91

Данные получены при тестировании ТДС в рабочем режиме АЭС

6.4.3. Ошибки самонагрева в ТДС

Все измерения температуры при помощи ТДС сопровождаются присущей этому датчику ошибкой из-за самонагрева. Эта ошибка является одной из главных причин, почему ТДС обычно не используют для измерения температуры в средах, плохо проводящих тепло, например в воздухе.

Для температурных измерений в воздухе и других плохо проводящих тепло веществах используются главным образом термопары.

Ошибка самонагрева обычно очень мала из-за того, что для измерения сопротивления ТДС используется слабый ток (например, 1 мА). Нагрев датчика этим током зависит от теплопередающих свойств ТДС (от времени реакции ТДС).

Увеличение температуры (ΔT) на единицу электрической мощности (ΔP), выделяющейся в ТДС, выражается следующим образом:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \left(\frac{\Delta R}{\Delta P} \right) \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta R} \right) \quad (6.17)$$

Таким образом,

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = (KCH)(\alpha) \quad (6.18)$$

где α есть температурный коэффициент сопротивления ТДС, номинальная величина которого равна примерно 0,4 Ом/°С для 100-омных ТДС. Таким образом, КСН это все, что требуется для расчета ошибки самонагрева ТДС.

В таблице 6.14 приводятся значения КСН и величины ошибок самонагрева для типичных ТДС ядерного класса. Эти результаты получены в испытаниях датчиков в воде комнатной температуры, при скорости потока равной 1 м/с.

6.5. Метод анализа шумов

Сигналы на выходе любых датчиков технологических процессов на АЭС обычно содержат флуктуации, вызываемые случайными компонентами нейтронного потока и теплопередачи, турбулентностью, вибрацией и другими механическими и термо-гидравлическими явлениями. Эти флуктуации (шумы) могут быть выделены из сигнала и проанализированы с целью определения времени реакции датчика. Метод анализа шумов обычно применяют для обнаружения закупорок, пустот и утечек в измерительных линиях давления (см. главу 9), измерения вибрации внутренних компонентов реактора при помощи нейтронных детекторов и обнаружения нарушений потока теплоносителя через активную зону при помощи перекрестной калибровки сигналов шума от нейтронных детекторов и термопар на выходе из зоны [17].

Таблица 6.14. Ошибка самонагрева типичных ТДС ядерного класса

Модель ТДС	R_0 (Ом)	КСН (Ом/Вт)	Ошибка само- нагрева (°С/Вт)
ТДС Rosemount			
176KF	200	6,1	7,6
104AFC	200	5,6	7,0
177HW	100	7,3	18,3
177GY	100	8,7	21,8
ТДС Weed			
9004	200	8,5	10,6
9019	200	8,0	10,0
ТДС других изготовителей			
Sensycom 1703	100	22,0	55,0
RdF 21458	200	4,6	5,8
RdF 21459	200	4,6	5,8
RdF 21432	200	3,0	3,8
Conax 7N13-1000-02	200	22,0	27,5
Conax 7RB4-10000-01	200	11,7	14,6

анализа шумов обычно применяют для обнаружения закупорок, пустот и утечек в измерительных линиях давления (см. главу 9), измерения вибрации внутренних компонентов реактора при помощи нейтронных детекторов и обнаружения нарушений потока теплоносителя через активную зону при помощи перекрестной калибровки сигналов шума от нейтронных детекторов и термопар на выходе из зоны [17].

Метод РСПТ является наиболее часто используемым способом проверки времени реакции датчиков температуры, так как он позволяет определить время реакции весьма точно. Если к точности не предъявляются большие требования (например, велик запас между номинальным временем реакции датчика и временем реакции, которое установлено техническими требованиями АЭС), то для этой цели можно использовать метод анализа шумов. С другой стороны, можно применить этот метод и для того, чтобы проверить, не изменилось ли время реакции датчика. Если время реакции значительно изменилось, то его точное значение может быть затем измерено, используя метод РСПТ. Преимущество метода анализа шумов заключается в том, что не надо прерывать работу датчика и можно одновременно испытывать много датчиков, используя одну многоканальную систему сбора данных.

Таблица 6.15. Результаты проверки метода анализа шумов в лаборатории Les Renardieres компании EdF

Модель ТДС	Время реакции датчика (секунды)	
	Метод впрыскивания	Метод анализ шумов
176 KF	0,14	0,18
177 HW	8,8	7,7
104 AFC	6,2	5,1
104 AFC с компаундом NEVER-SEEZ	4,1	3,7

6.5.1. Лабораторная проверка применимости метода

Подтверждение применимости метода анализа шумов для проверки времени реакции ТДС было впервые проведено автором вместе с французскими специалистами в лаборатории Les Renardieres компании EdF и в лаборатории Сакле КАЭ Франции [13], которые описаны выше, см. раздел 6.3.4. Результаты проверки на применимость приведены в таблице 6.15.

На рис. 6.28 приводится график спектральной плотности мощности (СПМ) для ТДС 177 HW компании Rosemount, который использовался в лаборатории Les Renardieres при проверке применимости метода

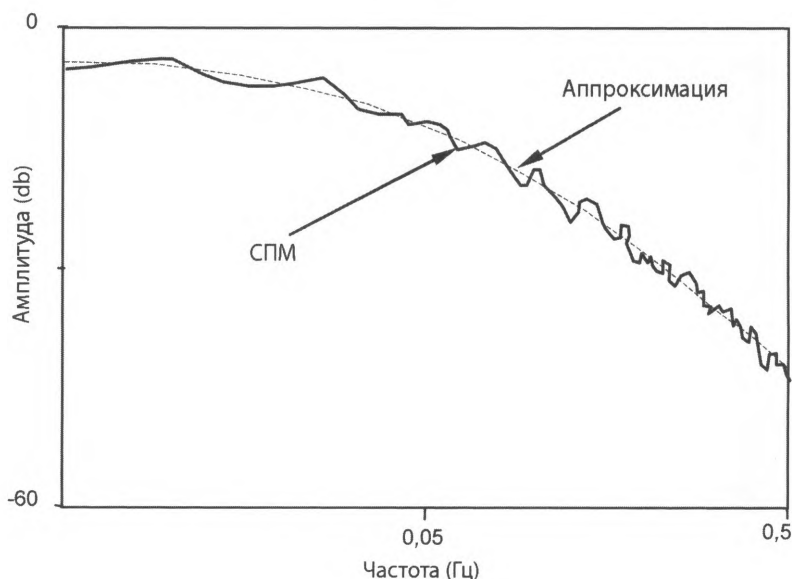


Рис. 6.28. Спектральная плотность мощности ТДС типа 177 HW Rosemount, полученная на основе данных, полученных на петле компании EdF

Таблица 6.16. Лабораторное подтверждение применимости метода анализа шумов для ТДС

Номер ТДС	Время реакции датчика (с)	
	Прямое измерение	Анализ шумов
1	4,5	4,5
2	2,2	2,0
3	3,9	4,0
4	3,0	3,2

анализа шумов. Для вычисления времени реакции использовалась приведенная на рисунке кривая, подобранная для соответствия графику СПМ. Время реакции ТДС было также рассчитано посредством анализа данных во временной области при помощи авторегрессивного моделирования (АМ). Результаты исследований СПМ и АМ затем усреднялись, чтобы получить значения времени реакции, представленные в таблице 6.15 для метода анализа шумов.

Дополнительное подтверждение применимости метода анализа шумов было получено на основе данных лабораторных петлевых испытаний при низком давлении и невысоких скоростях потока воды. В таблице 6.16 приведены результаты для четырех ТДС компании Rosemount, которые в то время были датчиками, наиболее часто используемыми на АЭС.

6.5.2. Проверка применимости метода в условиях АЭС

На нескольких АЭС времена реакции ТДС определялись с использованием как метода РСПТ, так и анализа шумов; испытания проводились в одинаковых условиях и результаты приведены в таблице 6.17. Типичный график СПМ, полученный на основе этих испытаний, показан на рис. 6.29, где также приведен и график СПМ для термопары, испытанной на АЭС с реактором PWR.

6.6. Правила Комиссии по ядерному регулированию (NRC) США

Руководства NRC № 118, NUREG-0800 и NUREG-0809 относятся, прямо или косвенно, к проверке времени реакции датчиков. Например, руководство 1.118 устанавливает критерии, требования и рекомендации для регулярных проверок систем защиты АЭС. В нем прописано, что «измерения времени реакции системы защиты должны проводиться регулярно с целью проверки полного времени реакции (принятого при

Таблица 6.17. Результаты испытания ТДС на АЭС с использованием метода РСПТ и анализа шумов

Номер ТДС	Время реакции датчика (с)	
	Метод РСПТ	Анализ шумов
1	3,7	3,4
2	3,5	3,3
3	3,6	2,9
4	4,0	4,5
5	2,9	3,3
6	4,5	4,4
7	3,4	3,0
8	4,6	4,4
9	4,6	4,4
10	6,5	6,8
11	2,4	2,8
12	2,7	2,6
13	2,4	2,1
14	2,4	1,7
15	0,9	0,9
16	3,5	3,2
17	3,7	4,0
18	2,7	2,7

анализе безопасности установки) для всех частей системы, начиная с датчика и кончая работой приводного механизма».

В руководстве 1.118 дается ссылка на два стандарта: IEEE 279 и IEEE 338, и указывается, что критерии, требования и рекомендации этих стандартов в общем применимы, несмотря на несколько исключений и (или) разъяснений.

Впервые руководство 1.118 было выпущено в середине 1970-х годов и дало толчок разработке новых методов для бездемонтажного испытания ТДС и датчиков давления, уровня и расхода на АЭС. В частности, это руководство в значительной мере стимулировало разработку метода РСПТ на основе которого NRC выпустила Отчет об оценке безопасности (Safety Evaluation Report, или SER), которому было присвоено

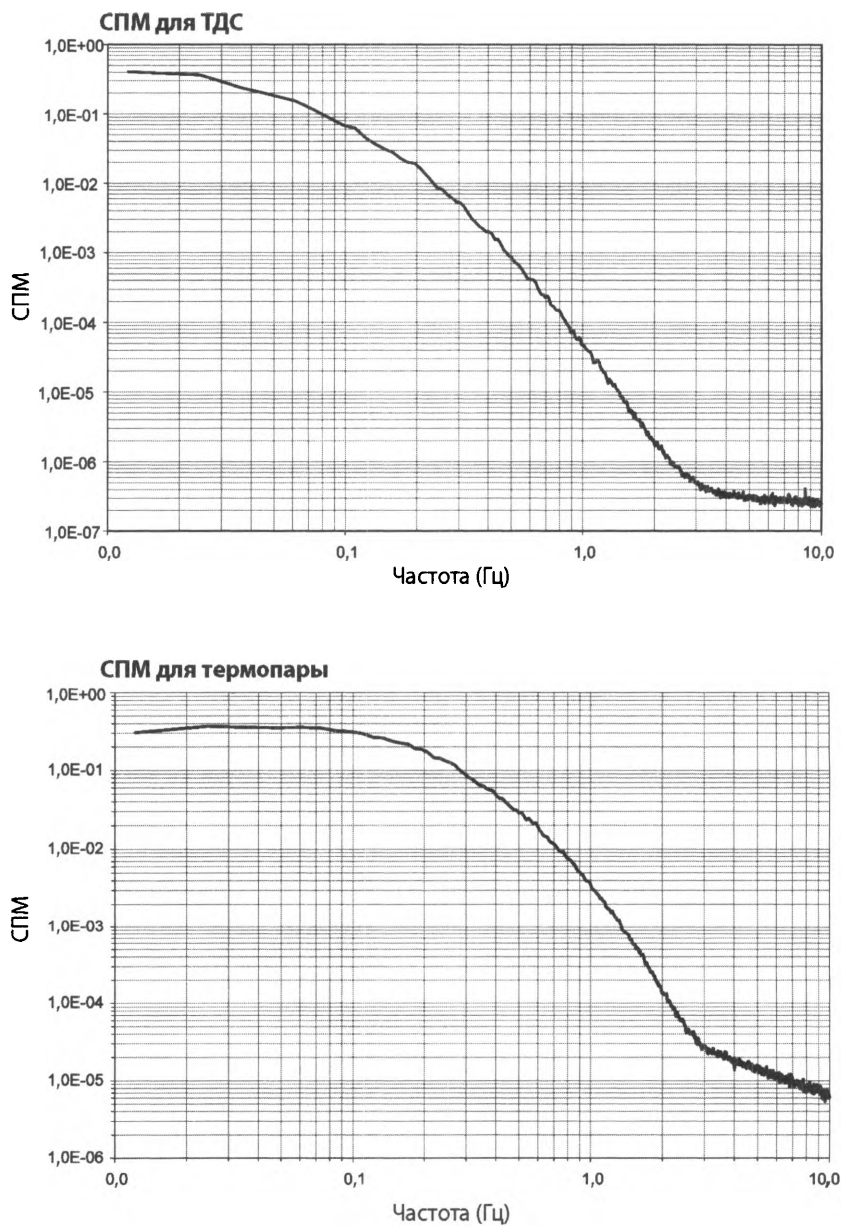


Рис. 6.29. Спектральные плотности мощности ТДС и термопары, полученные на основе испытаний на АЭС с РВР в условиях рабочего режима

обозначение NUREG-0809 и посредством которого NRC дала одобрение методу РСПТ для измерения времени реакции ТДС без демонтажа датчиков с мест их установки на АЭС [11].

В дополнение к методу РСПТ, вышеупомянутый SER включает в себя обзор методов самонагрева и анализа шумов и, в частности, характеризует их в качестве допустимых способов качественного мониторинга для проверки степени деградации времени реакции датчиков.

Для проверки времени реакции ТДС метод анализа шумов не используется настолько широко, как РСПТ, потому что метод РСПТ позволил удовлетворить запросы атомной промышленности в этой области. Что же касается проверки времени реакции термопар, то, несмотря на успешное использование метода РСПТ, в атомной промышленности предпочитают применять метод анализа шумов и используют его чаще. Такое положение вещей объясняется тем, что для испытания термопар методом РСПТ требуется большая сила нагревающего тока (более 500мА), при котором в термопарах могут возникнуть проблемы, связанные, в частности, с деградацией герметика и (или) изоляционного материала термопары.

В Приложении 13 главы 7 документа NUREG-0800 содержится изложение позиции NRC по отношению к калибровке и проверке времени реакции ТДС [10]. В нем отражены следующие два положения, характеризующие позицию NRC по вопросу о проверке времени реакции датчиков:

1. «Работоспособность ТДС характеризуется его точностью и временем реакции. Для обеспечения адекватных рабочих характеристик ТДС его точность и время реакции следует проверять»;
2. «Время реакции ТДС можно проверять при помощи метода РСПТ. При применении метода РСПТ следует пользоваться такой аналитической методикой, как преобразование РСПТ».

В Приложении В эти положения объясняются более подробно.

6.7. Факторы, влияющие на время реакции

Время реакции датчиков АЭС главным образом определяется внешними факторами, такими как скорость и температура рабочей среды, установка датчика в термоканал (если таковой используется) и ухудшение свойств датчика из-за старения. В этом разделе рассматривается влияние этих факторов на время реакции температурных датчиков.

6.7.1. Влияние окружающей температуры

Изменения окружающей температуры могут оказывать на датчик влияние, потому что: (1) от температуры зависит теплопередача между датчиком и окружающей его рабочей средой; (2) при изменении температуры изменяются размеры компонент датчика.

Коэффициент теплопередачи на поверхности датчика изменяется при изменении температуры, так как теплопроводность воды, ее удельная теплоемкость и вязкость зависят от температуры. Например, пленочный коэффициент теплопередачи для температурного датчика обычно уменьшается примерно вдвое при повышении температуры воды с 20°C до 300°C.

Влияние температуры на размеры датчика более ощутимо, в частности потому, что датчик состоит из нескольких слоев материалов. В идеале, эти материалы однородны и находятся в безупречном контакте друг с другом. На самом деле, существует вероятность того, что в датчике имеются трещины и зазоры между отдельными слоями и на его границах. По мере роста температуры эти зазоры и трещины могут расширяться или сужаться в зависимости от коэффициентов теплового расширения материалов датчика. Так как наполненные газом зазоры и трещины оказывают большое влияние на сопротивление теплопередаче, их наличие может явиться большим (но непредсказуемым) фактором, приводящим в итоге либо к увеличению, либо к уменьшению времени реакции датчика в зависимости от температуры. В этом смысле, влияние температуры на время реакции датчика может быть определено лишь путем тестирования без демонтажа в условиях рабочего процесса.

6.7.2. Влияние скорости потока рабочей среды

Пленочный коэффициент теплопередачи для температурных датчиков является функцией расхода рабочей среды. Степень влияния этого соотношения на время реакции датчика зависит от отношения внутреннего сопротивления теплопередаче к поверхностному (т.е. от модуля Био). Например, время реакции датчика, у которого внутреннее сопротивление теплопередаче составляет 90 % от полного сопротивления, может улучшиться лишь максимум на 10 % даже при очень высоких скоростях потока среды. Напротив, датчик с большим поверхностным сопротивлением теплопередаче может показать снижение времени реакции вдвое или даже более по мере увеличения скорости потока. Поэтому, в отличие от влияния температуры, влияние скорости потока

среды на время реакции можно предсказать, т.е. увеличение расхода всегда приводит к уменьшению времени реакции, и степень изменения времени реакции зависит от модуля Био. При большом значении модуля Био влияние скорости потока невелико, при малом — значительно.

6.7.3. Влияние внешнего давления

Если бы чехол датчика был сжимающийся, то увеличение давления приводило бы к уменьшению размеров материала датчика, улучшению теплопередачи и уменьшению времени реакции. Обычно, однако, чехол датчика практически несжимаем, и поэтому влияние давления незначительно.

Давление изменяет также термofизические свойства воды (плотность, теплоемкость, теплопроводность и вязкость), но эффект небольшой. Таким образом, полное влияние давления на время реакции датчика пренебрежимо мало.

6.7.4. Влияние старения датчика

Время реакции датчика определяется теплодиффузионными процессами и поэтому может увеличиваться при изменениях полного сопротивления теплопередаче и (или) эффективной теплоемкости материала датчика. Так как в общем случае время реакции увеличивается, полезно изложить возможные причины его изменений:

1. Изменение свойств наполнителя или связующего материала. Материал-наполнитель и (или) клей применяют для фиксации положения чувствительного элемента внутри температурных датчиков. Испытания на воздухе показали, что при нагреве до примерно 300°C из однородного, похожего на пластмассу материала клеящее вещество превращается в хлопьеобразный, негибкий материал. Это приводит к изменению (увеличению или уменьшению) времени реакции датчика.
2. Отложения на поверхности датчика. При отложении какого-либо материала (например, продуктов окисления или загрязнений) на поверхности датчика сопротивление теплопередаче увеличивается и время реакции возрастает.
3. Изменения в контактном давлении или контактной поверхности. В датчиках с термоканалами на время реакции может влиять контактное давление между чехлом датчика и внутренней стенкой термоканала, причем более высокое давление приводит к ускорению реакции датчика. В датчиках с пружинной

Таблица 6.18. Примеры ухудшения времени реакции ТДС на АЭС

Время реакции (с)		
Конец первой кампании	Конец второй кампании	Изменение (%)
ТДС с термоканалами		
2,7	3,7	37
4,0	5,9	48
2,4	3,3	38
ТДС прямого погружения		
1,9	2,5	32
2,8	3,9	39
2,0	2,5	25

Результаты получены при испытаниях ТДС методом РСПТ на месте установки датчиков на АЭС в условиях штатного рабочего режима

фиксацией постепенное ослабление пружины может приводить к постепенному уменьшению контактного давления и таким образом к увеличению времени реакции. К тому же, в некоторых датчиках используются втулки с точечными выпуклостями или канавками для обеспечения контакта между датчиком и внутренней стенкой термоканала; если при вибрации возникает движение датчика относительно термоканала, то происходящий при этом износ ухудшит контакт и приведет к замедлению реакции датчика.

В таблице 6.18 приведены выборочные результаты измерений ТДС прямого погружения и ТДС с термоканалами без демонтажа, проведенных на АЭС. Из приведенных данных видно существенное ухудшение времени реакции за время только одной кампании продолжительностью от 18 до 24 месяцев. Эти результаты нетипичны, но показывают, что даже за короткий период времени время реакции датчика может существенно ухудшиться. В таблицах 6.19 и 6.20 представлены дополнительные результаты измерений времени реакции ТДС на двух разных АЭС, выполнявшихся в течение короткого периода времени; эти результаты были выбраны для того, чтобы показать уровень деградации динамической характеристики датчика, наблюдавшейся на некоторых станциях.

6.8. Выводы

Время реакции датчика температуры зависит от его установки и от условий технологического процесса. В частности, значительное влияние на время реакции оказывают температура и скорость потока рабочей

Таблица 6.19. Типичные результаты регулярных измерений времени реакции ТДС на АЭС

Идент. № ТДС	Время реакции (с)			
	1997	1999	1999*	2000
411A1	5,3	5,9		6,3
411A2	3,3	3,3		4,2
411A3	5,0	5,0		4,9
411B	4,9	5,6		5,7
410B	5,4	6,3	3,8	3,7
421A1	4,7	5,2		5,6
421A2	4,8	4,8		4,6
421A3	5,4	5,5		5,6
421B	3,9	4,3		4,9
420B	4,8	5,4		5,8
431A1	4,4	4,0		4,5
431A2	5,5	5,8		6,2
431A3	4,5	4,0		4,1
431B	4,7	5,4		5,4
430B	5,7	6,3	3,8	3,8
441A1	5,7	5,7		5,7
441A2	4,5	4,2		5,2
441A3	4,7	5,2		5,1
441B	5,8	6,3	5,7	6,1
440B	5,4	6,1	4,2	3,8

Результаты получены при испытаниях ТДС методом РСПТ на месте установки датчиков на работающей АЭС

*ТДС, у которых время реакции превышает максимально допустимые 6,0 с, были заменены в 1999 году.

среды. Влияние скорости потока в общем можно предсказать, а влияние температуры нельзя: увеличение скорости потока рабочей среды приводит к уменьшению времени реакции датчика, а при увеличении температуры время реакции может либо возрасти, либо уменьшиться в зависимости от того, как температура влияет на свойства материала и теплопередачу внутри датчика. Для датчиков с термоканалами время реакции в значительной степени зависит от качества посадки концевой части датчика, где находится чувствительный элемент, в термоканал.

Таблица 6.20. Пример результатов, указывающих на ухудшение времени реакции ТДС за время одной кампании реактора PWR

Идент. № ТДС	Время реакции (с)	
	Первоначальные измерения	После одной кампании
112HA	3,4	6,1
112HB	4,7	5,6
112HC	4,3	5,4
112HD	3,2	4,4
112CA	3,0	3,7
112CB	6,3	7,3
112CC	3,4	3,6
112CD	5,6	5,4
122HA	3,3	3,7
122HB	4,4	5,1
122HC	3,5	3,6
122HD	3,7	5,2
122CA	3,5	4,8
122CB	3,9	4,7
122CC	2,8	3,1
122CD	4,3	4,6

Результаты получены при испытаниях ТДС методом РСПТ на месте установки датчиков на работающей АЭС

Влияние этого фактора является преобладающим для датчиков с термодоканами, т.е., любое несоответствие между датчиком и термодоканом может оказать большое влияние на время реакции датчика. С учетом этого, время реакции датчиков с термодоканами должно измеряться, когда датчик установлен в тот термодокан, в котором он используется.

Метод РСПТ был разработан в середине 1970-х годов для измерения времени реакции датчиков температуры на АЭС в реальных условиях их работы. Этот метод учитывает влияние на время реакции датчиков как условий их установки, так и условий технологического процесса в месте их установки. Метод регулярно используется на АЭС и в настоящее время он является единственным методом, получившим официальное одобрение NRC США.

Что касается термопар, метод РСПТ для них также хорошо разработан, но не был официально рассмотрен или одобрен регулирующим органом. Такое положение вещей объясняется главным образом тем, что на термопары, используемые на АЭС, не распространяются в настоящее время какие-либо жесткие требования, относящиеся к времени реакции. На некоторых АЭС время реакции термопар, однако, проверяют, и результаты отслеживают, вместе с другими данными по проверке работоспособности, такими как проверка кабелей и перекрестная калибровка, для установления работоспособности, надежности и остаточного срока службы термопар.

В дополнение к методу РСПТ, для проверки времени реакции датчиков температуры могут использоваться методы самонагрева и анализа шумов. Метод самонагрева не служит для определения времени реакции, но позволяет определить показатель, называемый коэффициентом самонагрева (КСН), который пропорционален времени реакции. Поэтому этот метод может применяться для обнаружения возрастания времени реакции датчика. Чувствительность метода не всегда высока, и он применим только для ТДС; для испытания термопар он непригоден.

Метод анализа шумов позволяет определить время реакции датчика, но обычно он не так точен, как метод РСПТ. Преимуществом метода анализа шумов, однако, является то, что во время тестирования этим методом датчик может по-прежнему продолжать эксплуатироваться. К тому же, метод анализа шумов является пассивным методом, и тестирование может проводиться дистанционно и одновременно для значительного числа датчиков.

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА АЭС

7.1. Типы датчиков давления

Первичные преобразователи давления или датчики, используемые на АЭС, являются электромеханическими системами, предназначенными для измерения давления или перепада давления (в том числе, с целью определения уровня и расхода). В данной книге термин *датчик давления* используется для обозначения датчиков давления, уровня или расхода.

Датчик давления может рассматриваться как сочетание двух систем: механической и электронной [18]. Механическая система датчика давления включает в себя гибкий чувствительный элемент (диафрагму, сильфон, трубку Бурдона и т.п.), который реагирует (изгибается, сжимается и т.д.) на действие давления. Движение этого чувствительного элемента передается на датчик смещения и преобразуется в электрический сигнал, который пропорционален давлению.

Для измерений давления на АЭС, связанных с обеспечением безопасности, обычно используются два типа датчиков давления, а именно датчики *равновесия перемещений* и датчики *равновесия сил*, различающихся тем, каким образом движение чувствительного элемента датчика преобразуется в электрический сигнал. В датчиках равновесия перемещений движение чувствительного элемента измеряется датчиком смещения (например, тензомером или емкостным датчиком) и преобразуется в электрический сигнал (например, постоянный ток от 4 до 20 мА), пропорциональный давлению. В датчиках равновесия сил

прилагаемое давление приводит к тому, что чувствительный стержень датчика отклоняется; это отклонение компенсируется электромеханической системой обратной связи датчика, включающей в себя силовой двигатель, используемый для удержания чувствительного стержня в равновесном положении. Сила тока, подаваемого на двигатель в этом случае, будет пропорциональна прикладываемому давлению.

Электронная система датчика включает в себя активные и пассивные компоненты, а также электронные схемы, выполняющие обработку сигнала, температурную компенсацию и обеспечивающие линейность выходного сигнала. Обычно электронные системы для датчиков низкого и высокого давлений одни и те же, в то время как чувствительные элементы разные. Например, одна из фирм, производящих датчики давления, применяет три различных гибких элемента для того, чтобы обеспечить измерение давления в нескольких диапазонах, от 0 до максимума 200 бар (около 3000 psi или 20 000 кПа), используя одну и ту же конструкцию для остальной части датчика.

7.2. Типы и применение датчиков давления

На АЭС обычно используют примерно от 200 до 800 датчиков давления и перепада давления (дифференциального давления) для измерения давления, уровня и расхода в первичном и вторичном контурах станции. Точное число датчиков, используемых для основных измерений, обычно определяется типом и конструкцией АЭС. Например, число датчиков, использующихся на АЭС с реактором PWR, зависит от числа петель охлаждения реактора. На рис. 7.1 показана петля первичного контура охлаждения реактора PWR и некоторые датчики, которые обычно установлены в ней. В число этих датчиков входят датчики перепада давления (dp), называемые также *модулями dp* или *датчиками dp* . Датчик перепада давления применяют для измерения расхода и уровня рабочей среды, в то время как обычный датчик давления используют для измерения абсолютного или манометрического давления. На рис. 7.2 объясняется принцип измерения абсолютного и манометрического давления или перепада давления. Для измерения абсолютной величины давления на одну сторону чувствительного элемента датчика подается давление технологического процесса, а с другой поддерживается вакуум. Для измерений манометрического давления одна сторона элемента находится под влиянием давления процесса, а другая — атмосферного давления окружающей среды. Как в датчиках для измерения абсолютного, так и манометрического давления ту сторону,

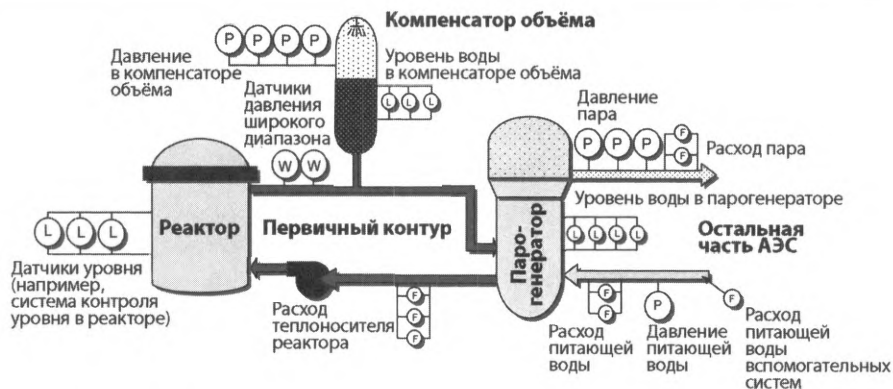


Рис. 7.1. Пример расположения основных датчиков давления в петле реактора PWR

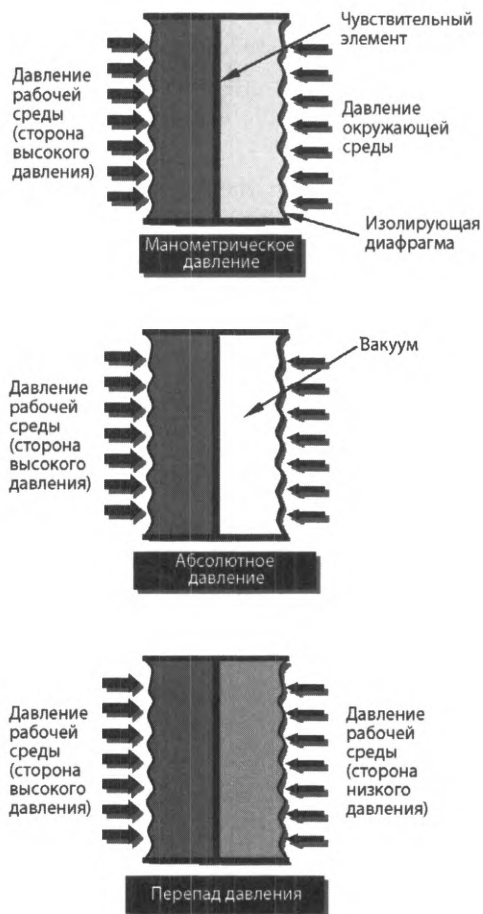


Рис. 7.2. Принцип измерения манометрического, абсолютного и перепада давления

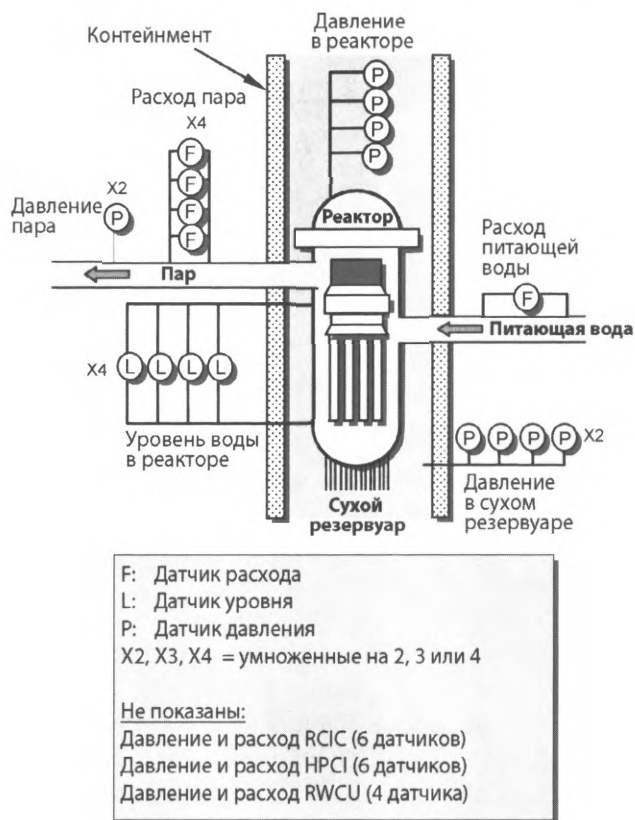


Рис. 7.3. Пример установки основных датчиков давления на АЭС с реактором BWR

на которую действует давление технологического процесса, называют *стороной высокого давления*. При измерениях перепада давления на обе стороны чувствительного элемента действует давление технологического процесса, при этом одну сторону произвольно обозначают как сторону высокого давления, а другую — низкого. Любой датчик перепада давления может применяться для измерения манометрического давления путем соединения одной его стороны с технологическим процессом, а другой — с атмосферой.

Верхняя граница обычных статических величин давления составляет как правило около 200 бар (примерно 3 000 psi или 20 000 кПа) для реакторов PWR и около 100 бар (примерно 1 500 psi или 10 000 кПа) для реакторов BWR. На рис. 7.3 приведена упрощенная схема АЭС с реактором BWR и некоторыми из основных датчиков давления, используемых в этом типе АЭС.

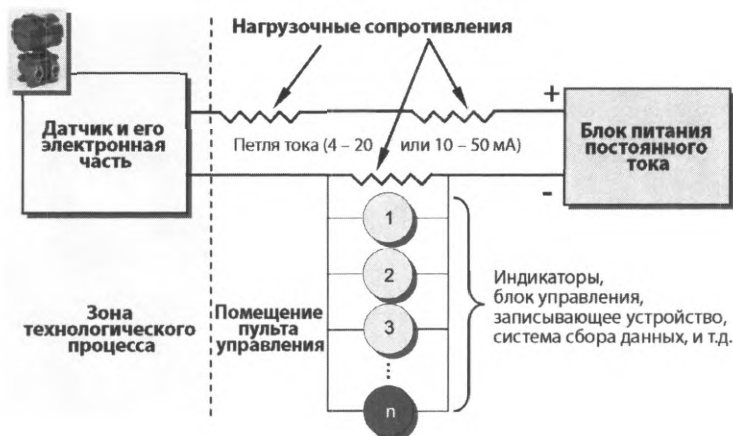


Рис. 7.4. Электрические компоненты цепи датчика давления

Движение чувствительного элемента в датчиках давления на АЭС обычно преобразуется в постоянный ток и передается на расстояние, используя двухпроводную цепь. Эта цепь состоит из датчика в зоне технологического процесса и блока питания, который обычно располагается вдали от датчика на приборных стойках в районе пульта управления АЭС. Те же самые два провода, которые подают питание для электронной схемы датчика, используются для электрической цепи, в которую включены нагрузочные сопротивления, соединенные последовательно, как это показано на рис. 7.4. Перепад напряжения на этих сопротивлениях используется для измерения или мониторинга давления или перепада давления. Использование цепи электрического тока позволяет передавать данные о давлении на большое расстояние без потерь и со сниженным уровнем электрических помех и шума.

7.3. Квалификация¹ датчиков для применения на АЭС

Датчики давления, уровня и расхода поставляют большинство основных данных, необходимых для управления и обеспечения безопасности

¹ В некоторых областях термином квалификация называется либо процесс оценки уровня качества, либо сами предусмотренные уровни. В соответствии со стандартом IEEE Std. 323-2003, под квалификацией оборудования понимают процесс получения и подтверждения данных (обычно с помощью испытаний), гарантирующих, что оборудование будет работать в соответствии с заявленными техническими характеристиками в нормальных и аварийных условиях, а также в случае постулированных проектных аварийных ситуациях. — *Примеч. ред.*

АЭС. В зависимости от своего расположения и назначения некоторые из этих датчиков должны быть в состоянии выдержать любую потенциально возможную окружающую среду и обеспечить нормальную работу в условиях этой среды, включая работу до, во время и после аварии. По этой причине изготовители проводят типовые испытания соответствующих датчиков и квалифицируют их в лабораторных условиях, имитирующих аварийные. Масштаб квалификационных испытаний определяется местоположением датчика на АЭС и целью его использования.

Обычно наиболее обширные квалификационные испытания проводят для датчиков, которые предполагается использовать в качестве оборудования так называемого «класса 1Е» внутри защитной оболочки реактора или в других местах станции, отличающихся жесткими условиями. Термин 1Е означает классификацию электрического оборудования и систем с точки зрения обеспечения безопасности и характеризует оборудование, отказ или поломка которого могли бы привести к выбросу значительного количества радиоактивности в окружающую среду. Квалификация оборудования этого класса означает гарантию того, что оно будет продолжать работать во время и после так называемой проектной аварии.

Проектная авария состоит из гипотетического набора обстоятельств, которые представляют наихудшие события, принимаемые в качестве возможных для определенного оборудования на АЭС. Этот набор включает в себя сейсмические нагрузки во время землетрясения, радиационную обстановку, возникающую во время аварии с потерей теплоносителя (LOCA), и воздействие на датчики пара, температуры и давления, возникающих как при разрыве трубопровода высокого давления (HELB), так и при LOCA. Любое оборудование, прошедшее квалификацию для этих условий, может использоваться и для менее суровых условий в любом месте на АЭС. Обычно не требуется, чтобы все оборудование выдерживало испытания, содержащие такой набор жестких условий. Например, прибор, который предназначается для установки в условиях окружающей среды с умеренными параметрами, в частности во вспомогательном помещении, может подвергаться испытаниям при менее жестких условиях.

Следует отметить, что «класс Е» является термином, используемым в США. В различных организациях и странах классификация оборудования АЭС с точки зрения обеспечения безопасности определяется по-разному. На рис. 7.5 приводится сравнение различных схем классификации оборудования АЭС.

ОРГАНИЗАЦИЯ И (ИЛИ) СТРАНА	КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ			
МАГАТЭ	Системы, важные для обеспечения безопасности		Системы, не важные для обеспечения безопасности	
	Система безопасности	Система, связанная с безопасностью		
Международная электротехническая комиссия	Категория А	Категория В	Категория С	Не класси- фицировано
Франция	1E	2E	IFC/NC	
Требования европейских энергокомпаний	F1A (автоматика)	F2B (автоматика и ручное управление)	F2	Не класси- фицировано
Великобритания	Категория 1		Категория 2	Не классифицировано
США	1E	Неядерная безопасность		

Рис. 7.5. Классификация оборудования АЭС с точки зрения обеспечения безопасности (по документу МАГАТЭ IAEA-TECDOC-1402, 2004 год)

В соответствии с законом США, определенным в Кодексе федеральных нормативов (Code of Federal Regulations, сокращенно CFR) как документ 10 CFR 50.59, должны быть определены и квалифицированы в отношении их применения и требуемых рабочих характеристик следующие три категории электрического оборудования, важные с точки зрения обеспечения безопасности: (1) оборудование, связанное с обеспечением безопасности (класс 1E); (2) оборудование, не связанное с обеспечением безопасности (оборудование не класса 1E), отказ которого мог бы отрицательно повлиять на другое оборудование, связанное с обеспечением безопасности; (3) оборудование для мониторинга послеаварийной обстановки, как оно определено в нормативном руководстве 1.97 NRC США.

7.3.1. Процедура квалификации

Общий подход к проведению квалификационных испытаний оборудования для АЭС заключается в том, чтобы искусственно состарить это оборудование на срок его проектной службы или службы, на которую он квалифицируется. Для датчиков давления старение обычно достигается посредством консервативного сочетания воздействия радиации,

определяемого сроком службы станции, старения из-за воздействия высоких температур, вибрации и циклических изменений давления. Старение можно ускорить, используя документированные методы, приемлемые для атомной промышленности, например, теорию термического старения Арениуса. При квалификационных испытаниях часто применяют совместное воздействие радиационного облучения, циклических изменений давления и повышенных температур.

Испытания старением обычно сопровождаются сейсмическими испытаниями. Процедуры, рекомендованные для сейсмических испытаний, установлены Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) в стандарте IEEE 344. Если оборудование предназначено для установки внутри защитной оболочки реактора или в месте, где оно может оказаться под водой или под воздействием высокой влажности или радиации во время аварии, то его следует также подвергнуть квалификационным испытаниям, относящимся к воздействию окружающей среды. Испытания по воздействию окружающей среды обычно выполняют после сейсмических испытаний и проводят в соответствии с требованиями стандарта IEEE 323. Датчик давления, который успешно прошел сейсмическую квалификацию и (или) квалификацию по воздействию на него окружающей среды, часто называют *датчиком ядерного класса*.

7.3.2. Квалифицированный срок службы

Номинальный (квалифицированный) срок службы оборудования устанавливается по результатам квалификационных лабораторных испытаний. На рис. 7.6 показана зависимость номинального срока службы датчика давления ядерного класса в зависимости от температуры, воздействию которой он подвергается во время работы АЭС в штатном режиме. На рис. 7.6 для датчика приведены две кривые этой зависимости: одна — для измерительного модуля (корпуса и других конструктивных компонент), а вторая — для его электронных компонент. Ясно видно, что для одной и той же рабочей температуры электронные компоненты датчика имеют более короткий номинальный срок службы, чем его измерительный модуль.

Зависимость между сроком службы датчика и рабочей температурой, воздействию которой он обычно подвергается, определяет предельные значения рабочей температуры, которые не должны превышаться, чтобы датчик мог быть использован в течение всей длительности его срока службы. Пример, представленный на рис. 7.6, показывает, что если

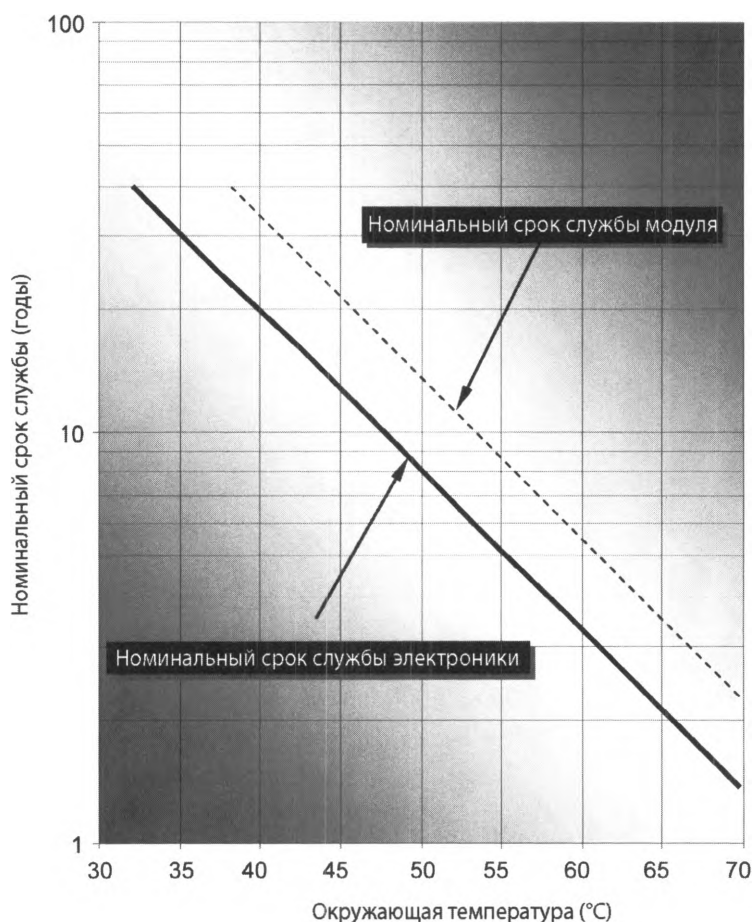


Рис. 7.6. Пример зависимости номинального срока службы датчика давления ядерного класса от рабочей температуры

электронная часть датчика заменяется в конце ее срока службы, то номинальный срок службы датчика может быть продлен до конца срока службы его измерительного модуля.

7.4. Изготовители датчиков давления

Большинство датчиков давления, используемых в системах безопасности АЭС, производятся лишь небольшим числом (менее десяти) фирм-изготовителей. Начиная с 1960-х годов, фирмы Barton, Foxboro и Rosemount поставили большинство датчиков давления для АЭС в США. Наиболее распространенные модели датчиков этих изготовителей и некоторые их характеристики представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Типичные датчики давления, применяемые на АЭС

Фирма-изготовитель	Номер модели	Код диапазона	Квалификация относительно окружающей среды	Номинальное время реакции (с)
Barton	752		Нет	Нет данных
	763		Да	< 0,18
	764		Да	< 0,18
Foxboro	E11		Нет	< 0,30
	E13		Нет	< 0,30
	NE11		Да	< 0,30
	NE13		Да	< 0,30
Rosemount	1152	3	Да	0,31
		4	Да	0,13
		5	Да	0,09
		6	Да	0,06
	1153	3	Да	2,0
		4	Да	0,5
		5–9	Да	0,2
	1154	4	Да	0,5
		Другие	Да	0,2

1. Датчики Foxboro в настоящее время поставляются для АЭС фирмой Weed Instrument Company.
2. Значения времени реакции, представленные в таблице, взяты из характеристик от фирм-изготовителей. Реальные времена реакции могут значительно от них отличаться.
3. Различные изготовители могут использовать разные определения времени реакции датчика.

Заметим, что некоторые из этих датчиков не имеют квалификацию относительно условий окружающей среды несмотря на то, что они используются для целей, связанных с обеспечением безопасности. Это объясняется тем, что эти датчики установлены в тех местах на АЭС, которые не подвержены последствиям аварии с потерей теплоносителя (LOCA).

В таблице 7.1 также приведены значения времени реакции датчиков, указываемые изготовителями для своих моделей. Эти данные касаются

номинальных значений времени реакции; реальные времена реакции конкретных датчиков могут значительно отличаться от них. Также заметим, что различные изготовители определяют *время реакции* по разному. Например, фирма Barton обычно определяет время реакции для своих датчиков как время, требующееся для того, чтобы сигнал от датчика достиг своего конечного значения после ступенчатого изменения давления на входе от 10% до 90%. Фирма Rosemount в большинстве случаев пользуется понятием *постоянной времени* (т.е. времени, требующегося для того, чтобы сигнал на выходе датчика достиг 63,2% от своего конечного значения после ступенчатого изменения давления), а информация о времени реакции датчиков фирмы Foxboro часто основывается на данных их частотной характеристики.

Начиная с 2000 г. датчики Foxboro для применения на АЭС поставляются фирмой Weed Instrument Company. Фактически, с течением времени названия фирм-изготовителей и поставщиков датчиков давления для АЭС претерпевали изменения вследствие слияний компаний и покупок предприятий, а также по другим причинам. В недалеком прошлом, помимо трех упомянутых выше фирм-изготовителей, датчики давления поставлялись под названиями нескольких поставщиков, таких как: Westinghouse Veritrak, Tobar, Camille Bauer, Fischer & Porter (F&P), Gould, Hartmann & Braun (H&B), Schlumberger, Gulton-Statham, Bailey Sereg S.A., KDG Mobrey и других. Датчики Rosemount и KDG Mobrey поставляются теперь фирмой Emerson Process Management Company; датчики Veritrak и Tobar – фирмой Weed Instrument Company; датчики Gulton-Statham – фирмой АМТЕК. Есть и другие вновь появившиеся фирмы-поставщики для моделей датчиков, упомянутых выше.

Из всех упомянутых фирм-изготовителей датчиков, Foxboro и F&P обычно выпускают для применения на АЭС датчики типа равновесия сил, а остальные изготовители – датчики типа равновесия перемещений. В следующих разделах приводится описание моделей датчиков четырех фирм-изготовителей, чья продукция используется в атомной промышленности США начиная с середины 1960-х годов.

7.4.1. Датчики фирмы Barton

Для применений, связанных с обеспечением безопасности АЭС, используются четыре модели датчиков давления фирмы Barton: 752, 753, 763 и 764. На рис. 7.7 и 7.8, представлены снимки датчиков моделей 752 и 764 (для моделей 753 и 763 отдельные фотографии не представлены, так как эти модели по своей конфигурации подобны моделям 752



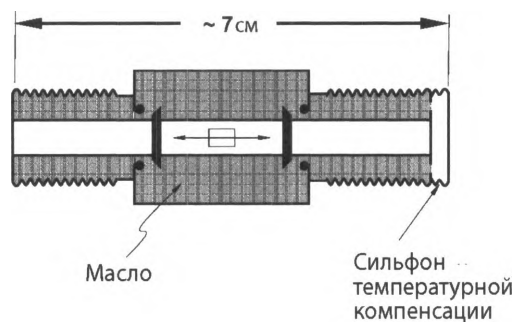
Рис. 7.7. Датчик фирмы Barton, модель 752 (корпус с электронными компонентами датчика модели 753 выглядит похожим образом)



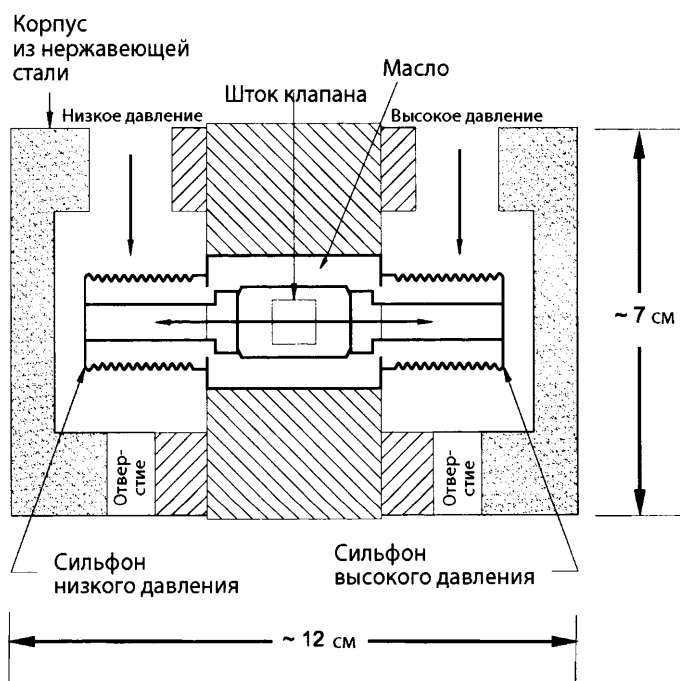
Рис. 7.8. Датчик фирмы Barton, модель 764 (корпус с электронными компонентами датчика модели 763 выглядит похожим образом)

и 764, соответственно). Принципы работы четырех моделей датчиков Barton по существу идентичны за исключением чувствительных элементов, отличных для каждой модели.

Технические характеристики четырех датчиков Barton кратко представлены в таблице 7.2. Так как принципы их работы идентичны, ниже подробно описана только работа датчика модели 752.



а) Механизм компенсации температуры



б) Подробный чертёж БПД

Рис. 7.11. Чувствительный элемент датчика давления фирмы Barton, модель 752

Датчик Barton модели 753

Датчик фирмы Barton модели 753 является монометрическим датчиком давления, чувствительный элемент которого сделан с использованием трубки Бурдона. Тяга соединяет трубку Бурдона с консолью, которая изгибается пропорционально степени распрямления трубки. Смещение консоли измеряется аналогично тому, как это делается в датчике Barton модели 752. Принцип работы датчика Barton модели 753 показан на рис. 7.12.

Датчик Barton модели 763

Датчик фирмы Barton модели 763 является монометрическим датчиком давления, который квалифицирован для работы внутри защитной оболочки АЭС. Чувствительным элементом этого датчика является трубка Бурдона, соединенная с консолью. Когда на датчик подается давление, оно распрямляет трубку Бурдона, что приводит к перемещению консольного рычага. Тензометры на противоположных сторонах рычага измеряют его перемещение и преобразуют это перемещение в электрические сигналы подобно тому, как это делается в датчике модели 753.

Датчик Barton модели 764

Датчик фирмы Barton модели 764 представляет собой дифференциальный датчик давления, в котором БПД используется в комбинации с электронной схемой. Датчик функционирует в значительной степени подобно тому, как работает датчик Barton модели 752, за исключением



Рис. 7.12 Схема датчика давления фирмы Barton, модель 753

под действием которого отклонение рычага сводится до нуля (уравновешивается). Электрический ток двигателя при поддержании рычага в равновесии пропорционален прикладываемому давлению. Более точно, сила, производимая приложенным давлением, уравновешивается усилием, развиваемым двигателем.

7.4.3. Датчики фирмы Rosemount

Для измерения давления, уровня и расхода в первичном и вторичном контурах АЭС применяют четыре датчика давления и перепада давления фирмы Rosemount: модели 1151, 1152, 1153 и 1154. Модели 1152, 1153 и 1154 квалифицированы для применений, связанных с ядерной безопасностью, в то время как модель 1151 является датчиком общего назначения, который на АЭС используется для целей, не связанных с обеспечением безопасности. Данные о квалификации этих моделей датчиков Rosemount представлены в таблице 7.4.

Таблица 7.4. Квалификация датчиков фирмы Rosemount

Модель датчика	Наличие/отсутствие квалификации
1151	Применения, не связанные с ядерной безопасностью Квалификация для ядерных применений отсутствует Документ 10CFR21 не применим
1152	IEEE-323-1971 и IEEE-344-1975 Применения, где требуется квалификация лишь в отношении сейсмических нагрузок
1152-T1805	Датчик с сейсмической квалификацией для применений при токах 10– 50 мА
1153 Серия В	IEEE-323-1974 и IEEE-344-1975 Квалифицирован для реакторов BWR для применений снаружи защитной оболочки PWR Первый датчик давления, квалифицированный по IEEE-323-1974
1153 Серия D	IEEE-323-1974 и IEEE-344-1975 Спроектирован для применений внутри защитной оболочки PWR (имеет корпус из нержавеющей стали) Квалифицирован группой пользователей Wyle
Электронные схемы класса «R»	Улучшают работу датчиков серий В и D в условиях высокой радиации
1154	IEEE-323-1974 и IEEE-344-1975 Высококачественный датчик класса 1E Улучшенные характеристики в условиях повышенных радиации и температуры
1154 серии Н	Датчик класса 1E с наилучшей технической характеристикой, квалифицированный по IEEE-323-1974 и IEEE-344-1975

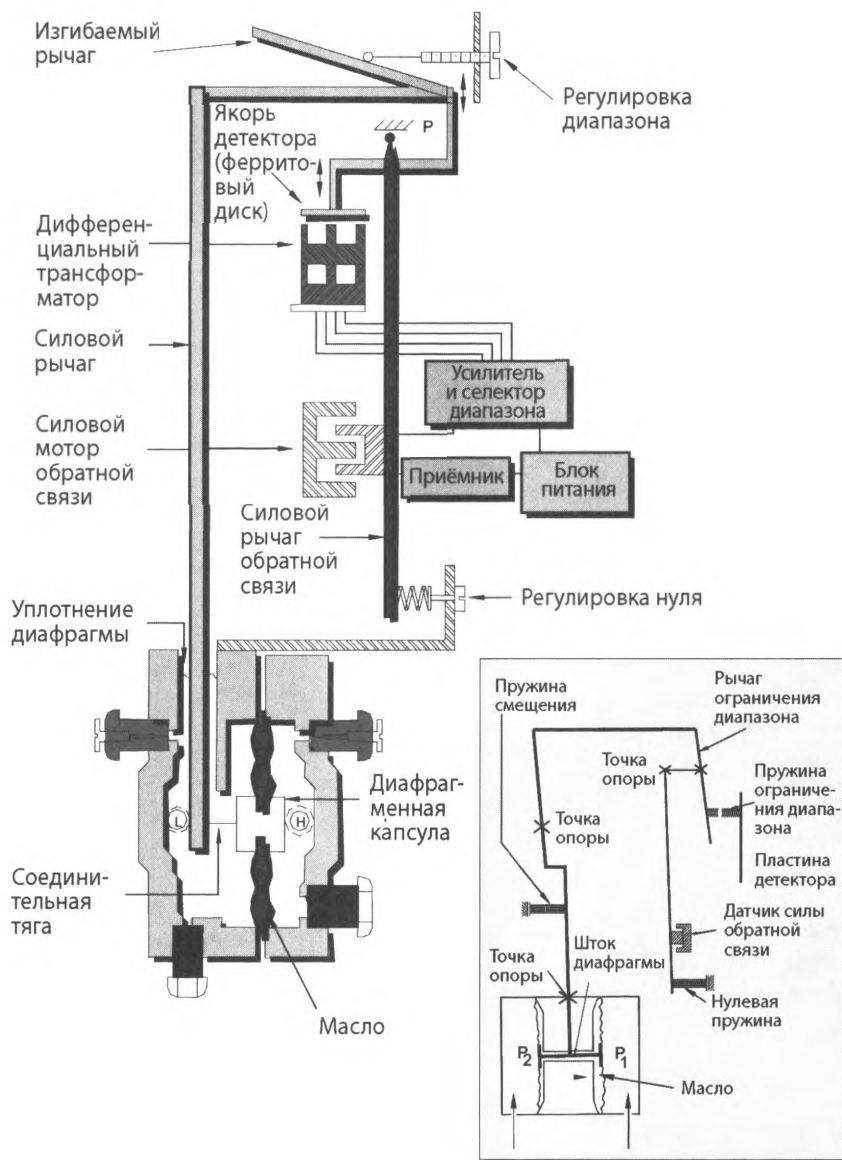


Рис. 7.14. Схема датчика давления фирмы Foxboro и его чувствительного элемента, использующего диафрагменную капсулу

Рассматриваемые четыре модели датчиков Rosemount схожи по своему внешнему виду и принципу работы. На рис. 7.17 представлена фотография датчиков коммерческого и ядерного классов, а на рис. 7.18 объясняется принцип работы чувствительного модуля этих датчиков. Этот модуль представляет собой заполненный маслом датчик емкостного типа,

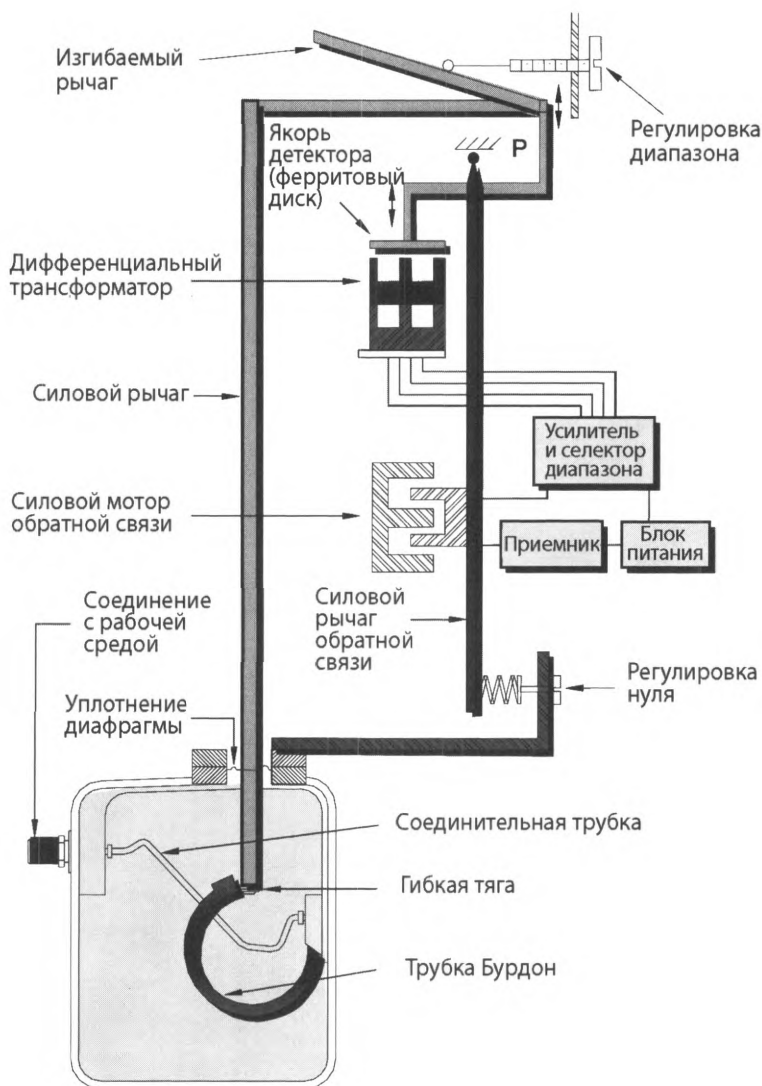


Рис. 7.15. Схема датчика давления фирмы Foxboro и его чувствительного элемента, использующего трубку Бурдона

известный как Дельта-модуль (δ -модуль). Этот модуль отделен от рабочей среды изолирующей диафрагмой, и силиконовое масло используется для передачи давления технологического процесса от изолирующей диафрагмы через несколько капиллярных трубок на чувствительную диафрагму в центре δ -модуля. На рис. 7.18а показана половина чувствительного модуля датчика Rosemount, состоящего из двух половин, центральной диафрагмы, изолирующей диафрагмы и масла-наполнителя

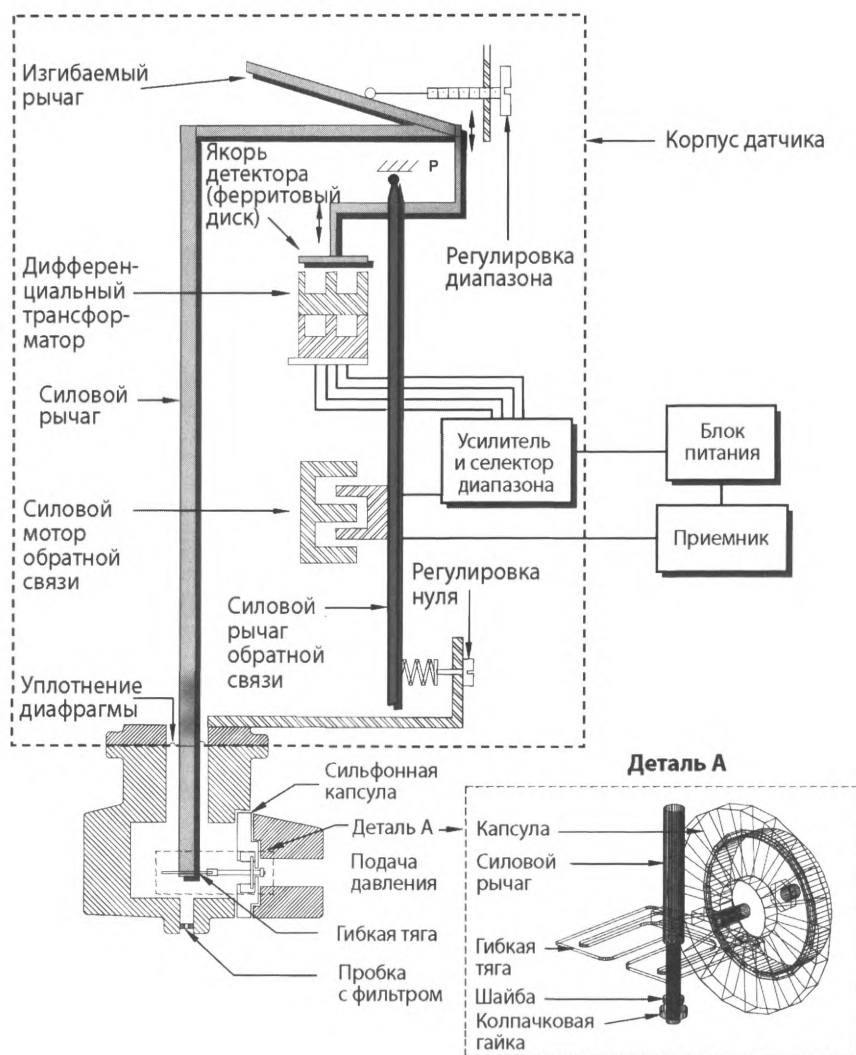


Рис. 7.16. Схема датчика давления фирмы Foxboro и его чувствительного элемента, использующего сильфонную капсулу

(см. рис. 7.18б). Каждая половина модуля состоит из металлической чаши с внутренним стеклянным вкладышем с полостью. На поверхность стеклянной полости нанесена плёнка металла, образующая одну из пластин конденсатора. Между полостью и задней стенкой чаши располагается керамический вкладыш, в котором имеются сквозные каналы. Этот вкладыш служит для передачи маслом гидравлического давления от рабочей среды к центральной диафрагме.

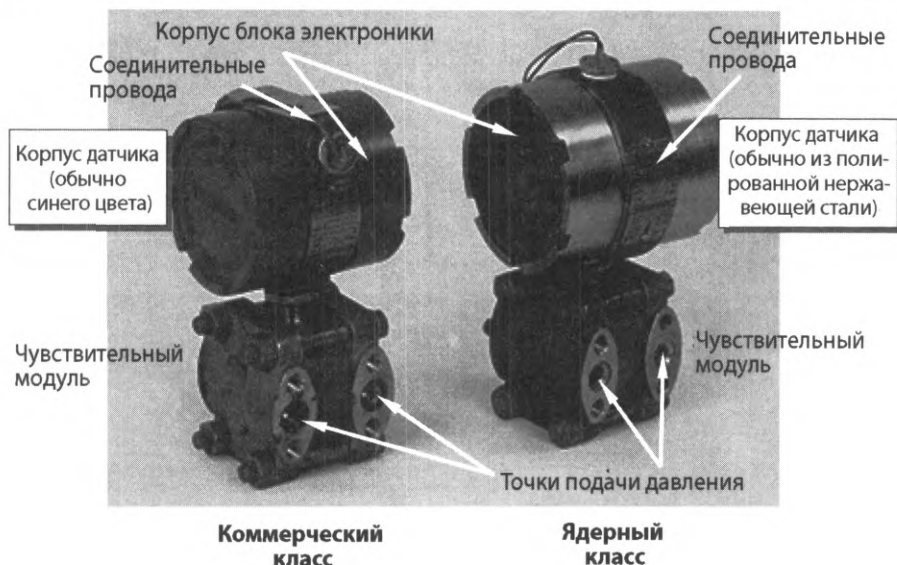
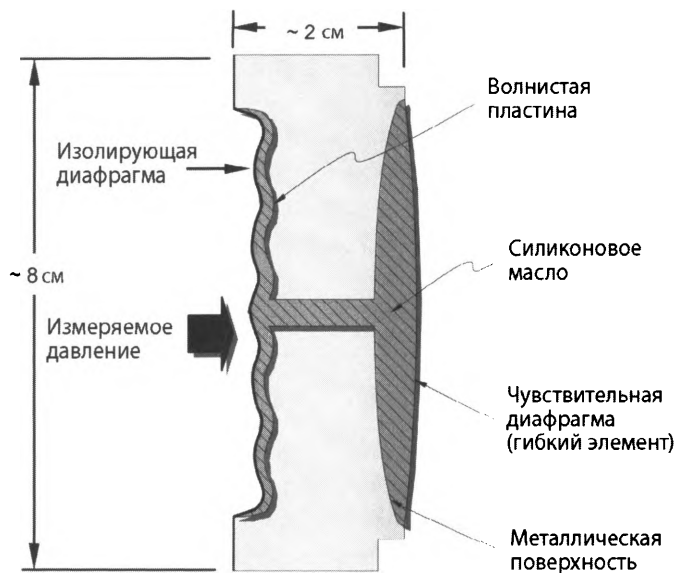


Рис. 7.17 Датчики фирмы Rosemount коммерческого и ядерного классов

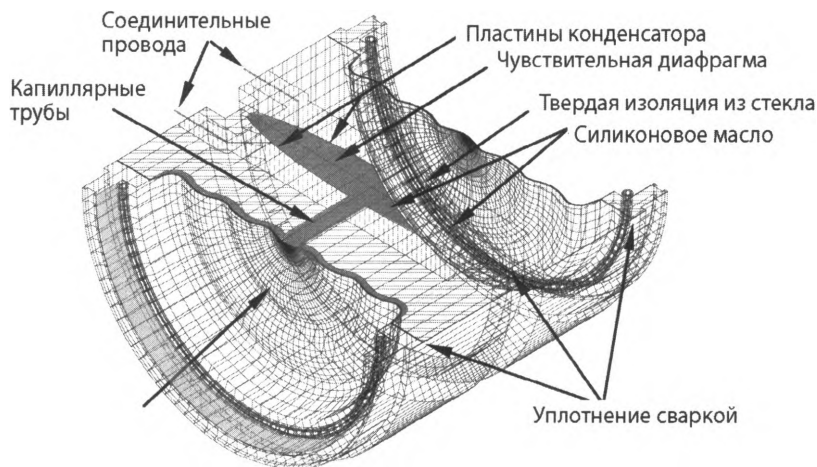
Соединительный провод, идущий к пластине конденсатора, является фактически трубкой малого диаметра, через которую каждая половина модуля после его сборки заполняется маслом. После того, как модуль заполнен маслом, наполнительная трубка обжимается и запаивается, становясь таким образом герметичным электрическим проводником, идущим к пластине конденсатора.

Способность чувствительного модуля точно измерять давление в различных диапазонах определяется четырьмя параметрами: кривизной полости, сделанной в обеих половинах датчика, диаметром конденсаторной пластины, образованной на поверхности полости, жесткостью (толщиной) центральной диафрагмы и жесткостью изолирующей диафрагмы. Последний параметр важен лишь при низких давлениях.

Перемещение центральной (чувствительной) диафрагмы ограничено в ее центре максимальной величиной, примерно равной 0,101 мм (0,004 дюйма) посредством того, что при таком перемещении диафрагма упирается в заднюю стенку соответствующей половины модуля. Такая конструкция обеспечивает защиту модуля от превышения допустимой величины давления. В датчиках Rosemount используются различные чувствительные диафрагмы в зависимости от диапазона давлений, измеряемых датчиком (от типа диапазона). Обычно, чем выше максимальное давление в диапазоне, тем толще чувствительная диафрагма и тем короче время реакции датчика.



а) Сечение одной половины чувствительного модуля Rosemount (вторая половина идентична)



б) Полный вид чувствительного модуля датчика Rosemount

Рис. 7.18. Схема чувствительного элемента датчика фирмы Rosemount

Положение чувствительной диафрагмы определяется по емкости конденсаторов по обе стороны от диафрагмы: емкость между диафрагмой и любой из пластин конденсатора составляет примерно 150 пикофард, а разность емкостей между конденсаторами, образованными диафрагмой и пластиной конденсатора, преобразуется электронной схемой

в сигнал постоянного тока силой 4–20 мА (или 10–50 мА). Электронная схема датчика включает диодный мост и термистор для температурной компенсации; диодный мост осуществляет выпрямление переменного тока питания обеспечивая постоянный ток сигнала на выходе датчика.

Основные характеристики датчиков Rosemount, представленных в таблице 7.5, заключаются в следующем:

1. Каждая модель датчика поставляется в исполнениях, предназначенных для измерений абсолютного, дифференциального и манометрического давления, за исключением модели 1154, которая поставляется лишь для измерения дифференциального и манометрического давления.
2. Модель 1152 квалифицирована для применений, связанных с обеспечением ядерной безопасности, но не для работы в послеаварийных условиях; для работы в таких условиях используются модели 1153 и 1154.
3. Электронные схемы модели 1151 и 1152 включают в себя демпфирующий потенциометр для ослабления внешнего шума, если это необходимо. Регулятор демпфирования позволяет получать постоянные времени от 0,2 до 2 секунд. Регулировка «по умолчанию» составляет 0,2 секунды и устанавливается на заводе перед отправкой датчика потребителю. В соответствии с информацией

Таблица 7.5. Технические характеристики датчиков фирмы Rosemount

Характеристики датчика	Номер модели датчика			
	1151	1152	1153	1154
Абсолютное давление	Да	Да	Да	Нет
Перепад давления	Да	Да	Да	Да
Манометрическое давление	Да	Да	Да	Да
Ядерная квалификация	Нет	Да	Да	Да
Послеаварийная квалификация	Нет	Нет	Да	Да
Регулировка демпфирования	Да	Да	Возможна как опция	Возможна как опция
Точность ($\pm\%$ диапазона)	0,25–0,5	0,25	0,25	0,25
Дрейф за 6 месяцев ($\pm\%$ верхней границы диапазона)	0,25–0,5	0,25	0,25	0,25

фирмы Rosemount, так как калибровка датчика не зависит от выбора постоянной времени, пользователь может регулировать демпфирование на площадке при установке датчика в технологическое оборудование. В качестве опции демпфирующее приспособление может быть включено и в датчики моделей 1153 и 1154.

4. Модели 1153 и 1154 могут использоваться на АЭС в качестве оборудования класса 1Е. В дополнение к квалификации в соответствии со стандартами IEEE-323 и IEEE-344, модель 1153 квалифицирована для работы в условиях, соответствующих аварийным, на реакторах BWR; то же справедливо для модели 1154 в отношении реакторов PWR.

Датчики Rosemount поставляются для измерений давлений в широком диапазоне, от нескольких миллибар до 200 бар (около 3000 psi) или выше. Каждая модель поставляется в нескольких исполнениях (обозначаемых кодом диапазона) в зависимости от диапазона предполагаемых рабочих давлений: в таблице 7.6 в качестве примера приведены

Таблица 7.6. Типичные характеристики датчика фирмы Rosemount, модель 1153 ряда В

Номер модели и ее описание		
Номер модели		Описание
1153AB		Абсолютное давление
1153DB		Перепад давления
1153GB		Манометрическое давление
1153HB		Перепад давления, диапазон высокого давления
Коды диапазона датчика и соответствующие времена реакции		
Код диапазона	Диапазон давления	Время реакции
3	от 0–12 до 0–75 мбар	2 с
4	от 0–62 до 0–374 мбар	0,5 с
5	от 0–311 до 0–1868 мбар	0,2 с
6	от 0–1,2 до 0–7 бар	0,2 с
7	от 0–3,5 до 0–21 бар	0,2 с
8	от 0–12 до 0–69 бар	0,2 с
9	от 0–34 до 0–207 бар	0,2 с
Характеристики сигнала на выходе датчика		
Дополнительная буква в номере модели	Сигнал на выходе	
P	4–20 мА, стандартный	
R	4–20 мА, улучшенная работа в условиях повышенной радиации	

характеристики для датчика модели 1153. Помимо диапазона измеряемых давлений, код типа диапазона определяет номинальное время реакции датчика. Для моделей 1151 и 1152 время реакции составляет от 0,2 до 2 с, в зависимости от диапазона и степени демпфирования. Для моделей 1153 и 1154 время реакции равно 2 с для кода диапазона 3; 0,5 с для кода 4 и 0,2 с для всех остальных кодов диапазона.

Для проведения калибровки большинство датчиков Rosemount имеют устройства установки нуля и регулировки номинального диапазона, доступ к которым возможен снаружи датчика. В дополнение к этому, электронная схема датчика позволяет проводить регулировку линейности характеристики датчика. Регулировка линейности производится на заводе-изготовителе и обычно не выполняется на местах, где датчик используется.

Следует отметить, что все описания датчиков, представленные в данном разделе для датчиков Rosemount и других фирм, сделаны на основе типовых конструкций датчиков и данных, накопленных в ходе их эксплуатации на АЭС, что может не отражать усовершенствования или изменения, которые могли быть внесены в последние годы. Более того, фирма Rosemount и другие изготовители производят в настоящее время для промышленных установок, включая АЭС, так называемые «умные» датчики и датчики, использующие цифровые технологии. Как традиционные, так и «умные» датчики, поставленные фирмой Rosemount и другими изготовителями, продемонстрировали свою надежную службу на АЭС, и в большинстве случаев уровень отказов таких датчиков был весьма низок.

7.4.4. Датчики фирмы Tobar

Для измерений давления, связанных с безопасностью АЭС, используют четыре модели датчиков фирмы Tobar: модели 32DP1 и 32DP2, являющиеся датчиками перепада давления, и модели 32PA1 и 32PA2, являющиеся датчиками абсолютной величины давления. До того, как фирма Tobar начала поставлять эти модели, те же датчики поставлялись фирмой Westinghouse Veritrac Company под другими номерами моделей, указанными в таблице 7.7. Различие между двумя датчиками перепада давления (32DP1 и 32DP2) заключается в степени их квалификации для ядерных применений. Модели, номер которых оканчивается на цифру 1, квалифицированы для применений в условиях повышенной радиации, а модели с цифрой 2 на конце — для низкого радиационного уровня. То же самое справедливо для моделей датчиков для

Таблица 7.7. **Взаимное соответствие моделей датчиков фирм Tobar и Veritrak**

Номер модели Tobar	Соответствующий номер модели Veritrak	Уровень квалификации
32DP1	76 DP2	Высокий уровень радиации
32DP2	76 DP1	Низкий уровень радиации
32PA1	76 PA2	Высокий уровень радиации
32PA2	76 PA1	Низкий уровень радиации

Примечания:

1. «76» в номерах моделей Veritrak соответствует «32» в номерах моделей Tobar; а «2» в номерах моделей Veritrak соответствует «1» в номерах моделей Tobar и наоборот.
2. Датчики Veritrak/Tobar поставляются в настоящее время фирмой Weed Instrument Company.

измерения абсолютной величины давления. Помимо датчиков, представленных в таблице 7.7, фирма Tobar поставляет датчики давления и перепада давления, имеющие те же номера моделей, но оканчивающиеся на цифру 5; эти датчики не квалифицированы для применений, связанных с ядерной безопасностью.

Чувствительные элементы в датчиках давления и перепада давления Tobar используют диафрагменные модули. В датчиках абсолютной величины давления (рис. 7.19) модуль в собранном виде состоит из диафрагмы, на которой размещена мостовая схема из тензометров. Диафрагма приварена к опорной и выводной платам, как это показано на рис. 7.20. Выводная плата содержит герметичные соединительные проводники, передающие электрический сигнал от изгибающегося элемента на усилитель.

Датчики Veritrak/Tobar для измерений перепада, абсолютной величины и манометрического давления на АЭС поставляются в настоящее время фирмой Weed Instrument Company под своим номером модели DTN2010. Этот датчик квалифицирован в соответствии со стандартами IEEE 323 и 344 для ядерных применений, в нем применены новые электронные схемы, усовершенствованные по сравнению с датчиками Veritrak/Tobar, и время реакции датчика может регулироваться электронным способом от 0,5 до 2,5 с.



Рис. 7.19. Схема датчика фирмы Tobar для измерения абсолютной величины давления

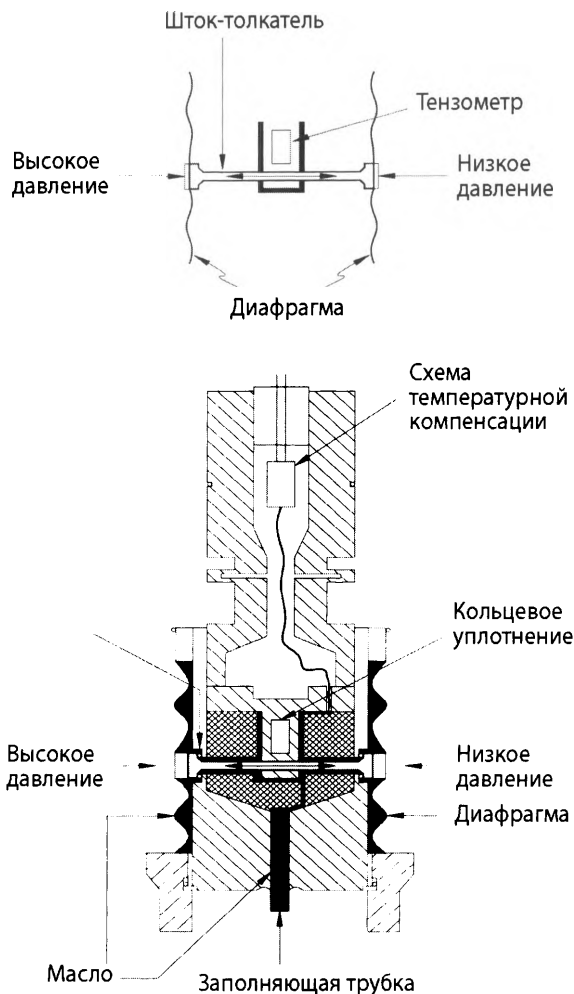


Рис. 7.20. Конструкция чувствительного элемента датчиков фирмы Tobar

В датчиках перепада давления линии давления рабочей среды подсоединяются к диафрагмам высокого и низкого давлений. Пространство между ними заполняется демфирующей жидкостью (рис. 7.20), сами диафрагмы соединяются при помощи толкателей с блоком чувствительного модуля (набором сопротивлений, чувствительных к напряжению). Для генерации электрического сигнала толкатели изгибают чувствительный модуль до 0,101 мм (0,004 дюйма). При подаче на датчик давления, превышающего допустимое, кольцевое уплотнение внутри диафрагменного блока садится на корпус модуля, и наполняющая жидкость, содержащаяся между диафрагмой и корпусом модуля, сдерживает дальнейшее движение диафрагмы. Блок чувствительного модуля состоит из изгибаемого элемента, на котором располагается

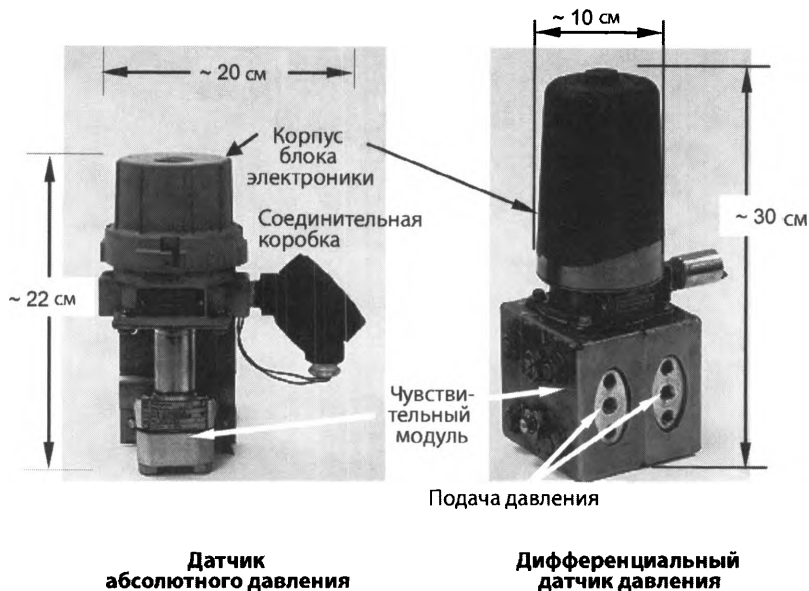


Рис. 7.21. Внешний вид датчиков фирмы Tobar (Weed)

мостовая схема из тензометров, замеряющая передвижение диафрагмы, подобно тому как это происходит в датчике абсолютной величины давления.

Фотография двух видов корпусов датчиков фирмы Tobar представлена на рис. 7.21. Следует отметить, что на АЭС больше не применяют датчики Tobar тех названий и номеров моделей, которые упоминаются в этой книге: следует использовать публикации фирмы Weed Instrument Company для ознакомления с современной информацией относительно этих датчиков.

7.5. «Умные» датчики давления

«Умные» телеметрические датчики давления стали применяться в атомной промышленности в конце 1970-х годов. В настоящее время они имеют различное применение, в том числе связанное с ядерной безопасностью, для чего некоторые «умные» датчики были квалифицированы изготовителем или организациями атомной промышленности. На рис. 7.22 представлены фотографии «умных» датчиков температуры и давления фирмы Rosemount.

«Умные» датчики давления Rosemount и другие «умные» датчики пользуются популярностью на АЭС из-за легкости проведения их калибровки



«Умный»
датчик
температуры

Интерфейс
для передающего
датчика



«Умный»
датчик
давления

Рис. 7.22. «Умные» модули датчиков давления фирмы Rosemount

(например, нет необходимости открывать корпус датчика), наличия запоминающего устройства, легкости настройки на нужный режим измерений, преимущества в отношении их стоимости по сравнению с обычными датчиками их класса, а также благодаря их улучшенным характеристикам. По мере того, как происходит постепенная замена стареющих и устаревших датчиков, атомная промышленность все более и более полагается на «умные» датчики. На рис. 7.23 показана фотография «умного» датчика давления, поставляемого фирмой Rosemount

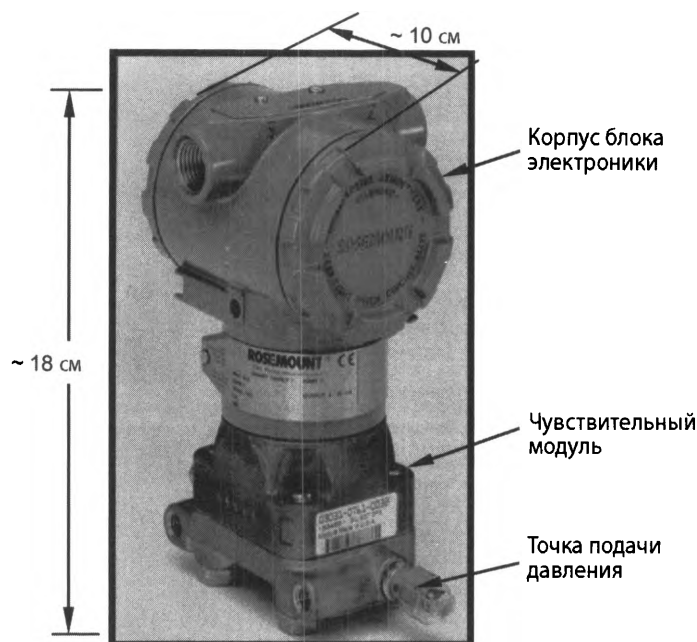


Рис. 7.23 «Умный» датчик давления ядерного класса фирмы Rosemount, модель 3051N

(модель 3051N) для использования на АЭС. Этот датчик имеет сейсмическую квалификацию как для применений в качестве оборудования класса 1E в соответствии со стандартом IEEE 344, так и для умеренных условий окружающей среды в соответствии с IEEE 323.

На рис. 7.24 представлены две блок-схемы, поясняющие устройство электрического контура, и типичные компоненты «умного» датчика.

7.6. Оптоволоконные телеметрические датчики давления

Помимо «умных» датчиков, атомная энергетика проявляет сильный интерес к оптоволоконным датчикам давления. В атомной энергетике уже с успехом применяются оптоволоконные кабели и приборы, особенно в тех зонах как обычных, так и усовершенствованных реакторных установок, где отсутствует радиация. Что касается применений в условиях повышенной радиации и внутри защитной оболочки реактора, то оптоволоконные датчики все еще находятся в стадии развития, и ни один крупный их поставщик пока не продемонстрировал интереса к разработке или квалификации таких датчиков для упомянутых выше



а) Схема электрической цепи для «умного» датчика



б) Типичные компоненты «умного» датчика

Рис. 7.24. Схемы электрического контура и электронных компонентов «умного» датчика фирмы Rosemount

применений. Такое положение вещей объясняется в основном опасениями технического характера в отношении влияния радиации на оптоволоконные компоненты, коммерческими аспектами, например, небольшим спросом на датчики для АЭС, трудностями с внедрением на АЭС новых видов оборудования и технологий, а также проблемами обеспечения качества [19]. В других отраслях промышленности, однако, оптоволоконные датчики успешно используют благодаря их устойчивости к электромагнитным и радиопомехам, неподверженности утечкам на землю, небольшому размеру, высокой чувствительности и возможности использования мультимплексных каналов передачи данных. Например, в автомобильной промышленности оптоволоконные датчики применяют из-за своих небольших размеров, в аэрокосмической – из-за их малого веса, а в нефтехимической – благодаря их

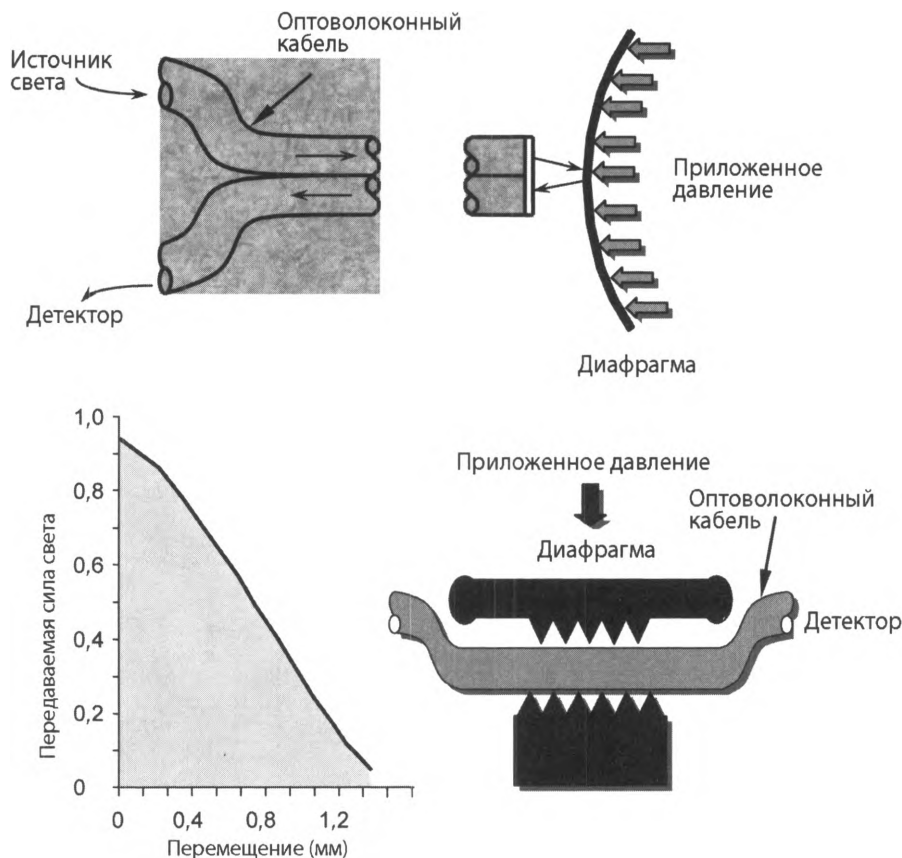


Рис. 7.25. Принцип работы простых оптоволоконных датчиков давления

взрывобезопасности. Принцип работы простых оптоволоконных датчиков давления проиллюстрирован на рис. 7.25. Помимо измерения давления подобные датчики разработаны для измерения температуры, механической нагрузки, вибрации и других параметров.

7.7. Беспроводные телеметрические датчики давления

Беспроводные датчики давления постепенно находят свое применение на АЭС, но пока не используются в зонах повышенной радиации или внутри защитной оболочки реактора для каких-либо измерений, критически важных с точки зрения безопасности. Прежде чем беспроводные датчики смогут применяться в повседневной практике АЭС для измерений важных параметров технологического процесса, необходимо решить ряд проблем и найти технические решения ряда вопросов.

Ожидается, однако, что с течением времени беспроводные датчики станут играть важную роль на АЭС, так как они позволяют существенно снизить затраты на прокладку кабелей и, что не менее важно, облегчить сбор данных для дистанционной диагностики и для мониторинга в режиме on-line с целью проверки рабочих характеристик оборудования станций и параметров технологических процессов. Ожидается, что следующее поколение усовершенствованных АЭС, которые, возможно, будут введены в эксплуатацию к 2020 году, и реакторы так называемого четвертого поколения, которые вступят в строй к 2030 году, будут использовать беспроводную технологию датчиков как в своих первичных, так и вторичных контурах реакторной установки.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Датчики давления на АЭС обычно располагают вдали от технологической среды, чтобы снизить влияние окружающей температуры на их работоспособность и номинальный срок службы. Высокие температуры окружающей среды (70°C и выше) могут отрицательно повлиять на механические компоненты датчика и уменьшить срок службы его электронных, в том числе полупроводниковых, компонентов. Дополнительными причинами для расположения датчика вдали от зоны процесса являются снижение отрицательного влияния радиации и вибрации, а также облегчение доступа персонала станции к датчику для его замены или технического обслуживания.

Для передачи от рабочей среды на датчик пневматического или гидравлического сигнала используют измерительные линии, соединяющие датчик давления с трубопроводами, корпусом реактора или другим основным технологическим оборудованием. В зависимости от назначения, на каждый датчик могут приходиться одна или две измерительные линии.

Измерительные линии также называют *импульсными трубками* или *приборными линиями*. На АЭС могут применять измерительные линии, заполненные как жидкостью, так и газом. Измерительные линии с жидкостью обычно содержат либо жидкую рабочую среду, либо масло, в зависимости от конструкции и назначения такой линии. Измерительные линии с газом могут содержать пар, воздух, азот или другие газы, причем, иногда в определенном месте линии осуществляется переход от газа к другой среде, например, к маслу или воде. С этой целью в измерительную линию устанавливают диафрагму, сиффон или конденсационную емкость.

8.1. Конструкция и монтаж измерительных линий

Измерительные линии давления в первичных контурах охлаждения АЭС обычно изготавливают из сплошных трубок нержавеющей стали с толщиной стенок около 2,5 мм и диаметром примерно от 10 до 15 мм. Во вторичных контурах АЭС, однако, большинство измерительных линий делают из углеродистой стали, а иногда и из меди для предотвращения коррозии.

Измерительные линии обычно имеют длину от примерно 10 м до более, чем 200 м, в зависимости от расположения датчика и его назначения на АЭС. В большинстве случаев предпочитают использовать сплошные трубы, избегая соединений, что позволяет снизить вероятность возникновения утечек. В силу того, что от длины измерительной линии зависит полное время реакции системы измерения давления, измерительные линии на АЭС стараются сделать как можно короче. По этой причине средняя длина измерительных линий датчиков, связанных с обеспечением безопасности, обычно составляет примерно 35 м или менее.

Системы измерительных линий проектируют таким образом, чтобы предусмотреть возможность их теплового расширения и вибрации без деформаций, слив наполняющей жидкости под действием силы тяжести и самопроизвольное удаление газа из линии. Для измерительных линий с жидкостью самоудаление газа обеспечивается таким наклоном линии, при котором любой газ или воздух может выйти в рабочую среду технологического процесса. Наклон измерительных линий обычно составляет около 10 см/м. Когда нет возможности смонтировать линию с таким наклоном, то наклон делают максимально возможным, обеспечивая наклон не менее, чем 1 см/м. Если линия не может быть смонтирована с требуемым наклоном, то в линиях с жидкостью в самой высокой точке необходимо предусмотреть выпуск газа, а в линиях с газом в самой низкой точке должен быть оборудован слив.

Критерии для конструкций и монтажа измерительных линий на АЭС содержатся в ряде промышленных документов и стандартов, например, в стандарте ISA S67.02 под названием «Стандарты для составных и сплошных трубопроводов, используемых для измерительных линий датчиков, связанных с обеспечением ядерной безопасности на АЭС». В этом стандарте приведены несколько конструкций измерительных линий, которые используют для различных целей как внутри, так и снаружи защитной оболочки реактора. Некоторые примеры этих конструкций кратко описаны ниже.

8.2. Измерительные линии датчиков внутри защитной оболочки реактора

На рис. 8.1 представлены следующие основные компоненты типичной измерительной линии датчика, расположенного на АЭС внутри защитной оболочки реактора:

- Основной вентиль. Первый вентиль в измерительной линии давления, он расположен в месте, где измерительная линия отходит от основного технологического оборудования.
- Конденсационная емкость. Эта емкость часто устанавливается в измерительных линиях датчиков перепада давления, которые используются для измерений уровня. Назначение конденсационной емкости заключается в заполнении водой, а не паром или воздухом, эталонного участка линии, ведущего к датчику.
- Ограничитель. Устройство, установленное как можно ближе к технологическому оборудованию, с целью снизить потери рабочей среды, если на участке измерительной линии, расположенном после ограничителя, возникнет разрыв. Одним из недостатков ограничителей является то, что они могут увеличить время реакции систем измерения давления. По этой причине в системах,

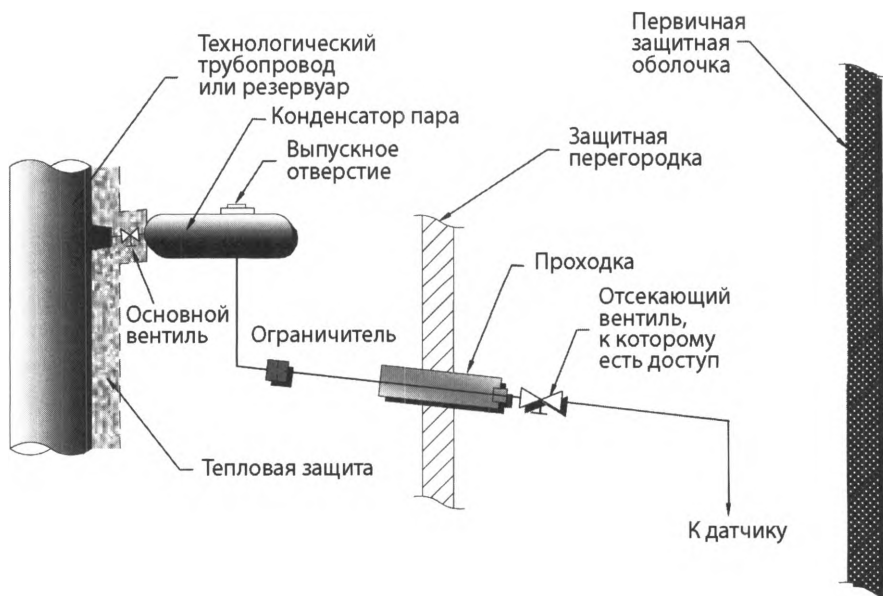


Рис. 8.1. Типичная измерительная линия давления (для воды и пара) внутри защитной оболочки реактора

где быстрая реакция крайне необходима, лучше отказаться от установки ограничителя.

- **Отсекающий вентиль.** Этот вентиль всегда устанавливается в измерительных линиях в месте, легко доступном обслуживающему персоналу станции, иногда даже во время работы станции. Отсекающий вентиль обычно устанавливается в дополнение к основному вентилю, но в зависимости от расположения и назначения системы измерения давления некоторые основные вентили могут выполнять роль отсекающего вентиля.
- **Уравнительный вентиль.** Дополнительный вентиль для датчиков перепада давления располагается на трубке, соединяющей обе измерительные линии; предназначен для выравнивания давлений, подаваемых на датчик, если это требуется во время калибровки и техобслуживания.

На рис. 8.2 приведена другая конструкция измерительной линии внутри защитной оболочки реактора. В этой линии не применяется конденсационная емкость, а диафрагма, показанная на рисунке, является изолирующей диафрагмой, предотвращающей проникновение рабочей среды на датчик. Участок линии справа от изолирующей

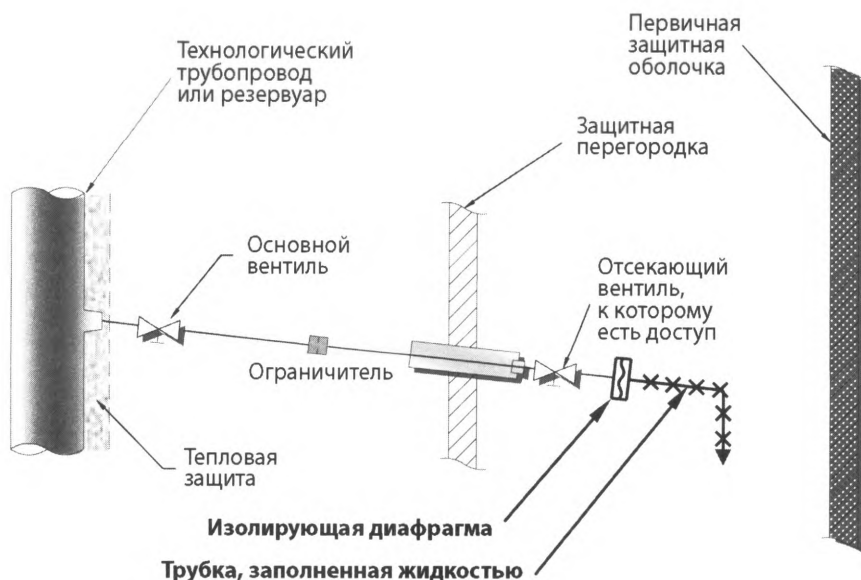


Рис. 8.2. Типичная измерительная линия давления, обеспечивающая изоляцию датчика от рабочей среды

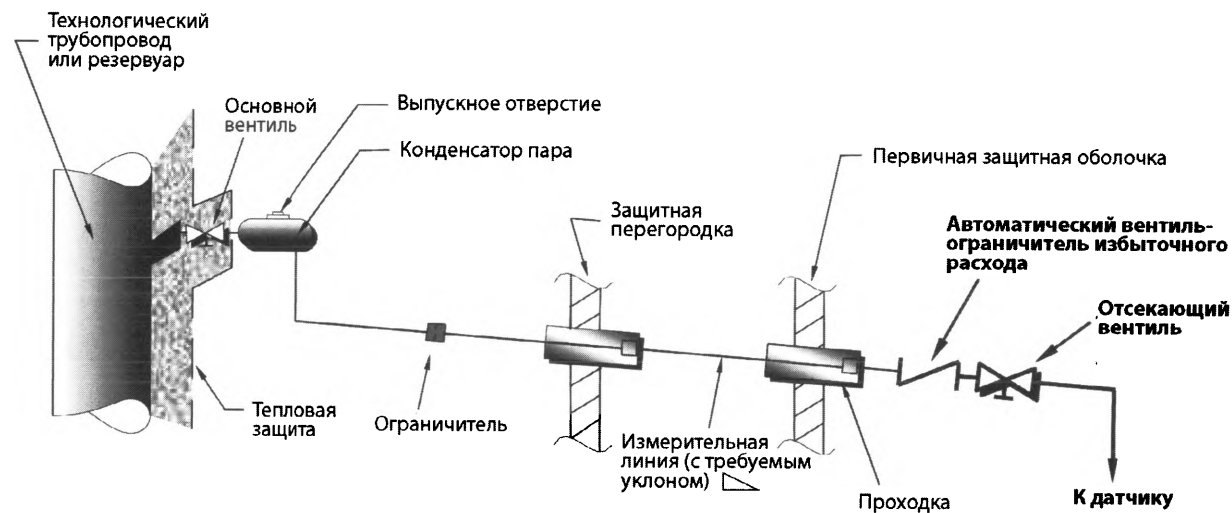


Рис. 8.3. Измерительная линия (для воды и пара) снаружи защитной оболочки реактора

диафрагмы заполнен подходящей жидкостью (на рис 8.2 это обозначено крестиками, нанесенными на линию). Изолирующая диафрагма полезна, когда рабочая среда коррозионна, радиоактивна или обладает другими свойствами, вредными для датчика или обслуживающего персонала.

8.3. Измерительные линии датчиков снаружи защитной оболочки реактора

Измерительные линии, выходящие за пределы защитной оболочки реактора, обычно имеют ту же конструкцию, что и линии, расположенные внутри, за исключением дополнительного приспособления, называемого «автоматическим отсекающим вентилем». Это устройство позволяет автоматически перекрыть измерительную линию, если на участке, расположенном за ним, произойдет разрыв (см. рис. 8.3).

Примером измерительной линии, которая проходит через защитную оболочку, является линия, ведущая к датчику измерения давления в зоне внутри этой оболочки. Эти датчики часто располагаются снаружи от защитной оболочки, хотя измеряют давление окружающей среды внутри нее. Измерительные линии для определения давления в зоне внутри защитной оболочки могут быть смонтированы по любой из схем, представленных на рис. 8.4. Заметим, что когда в измерительной линии находится воздушная среда, она монтируется с наклоном вверх, как показано на верхней из трех схем, представленных на рис. 8.4. Для большинства датчиков, измеряющих давление внутри защитной оболочки, измерительные линии заполняются маслом на протяжении линии от изолирующей диафрагмы до датчика.

8.4. Неисправности измерительных линий

В данном разделе обсуждаются неисправности, которые могут возникнуть в измерительных линиях, и их отрицательное влияние на точность и время реакции систем измерения давления.

8.4.1. Закупорки, пустоты и утечки

Ниже приводятся примеры неисправностей измерительных линий, которые наблюдались на АЭС:

- закупорки, вызывавшиеся осадком, присутствием бора или отложениями,
- попадание воздуха или газа в измерительные линии низкого давления,

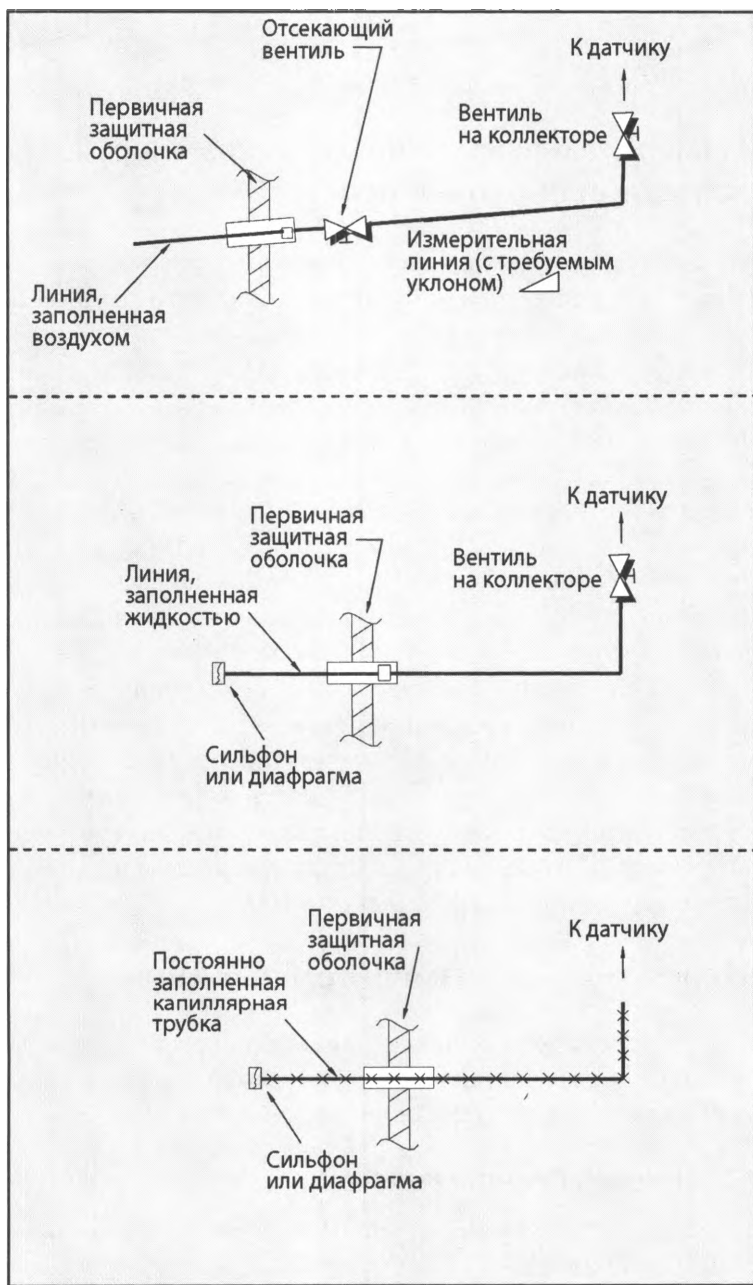


Рис. 8.4 Типичные схемы монтажа измерительных линий датчиков давления внутри защитной оболочки.

- замерзание измерительных линий (например, из-за проблем с материалом тепловой изоляции или контуром обогрева линии),
- неточное выравнивание или установка отсекающих и уравнивающих вентилей,
- утечки в измерительных линиях (например, из-за неисправностей вентилей).

Любое сочетание этих пяти неисправностей может увеличить время реакции системы измерения давления или привести к возникновению других проблем. Например, наличие воздуха в измерительной линии может не только увеличить время реакции, но и явиться причиной резонансов, которые приводят к колебаниям давления и ошибочным результатам измерений. Хотя воздух может раствориться в жидкой среде при высоких давлениях, наблюдалось много случаев, когда попавший в линии воздух не растворялся или выделялся из жидкости, как только давление в контуре оборудования снижали ниже некоторого порогового значения. Помимо возникновения проблем, связанных с реакцией системы во время переходных режимов, воздух в измерительной линии может отрицательно повлиять на точность измерения давления.

В таблицах 8.1 и 8.2 приведены примеры отчетов АЭС из двух баз данных LER (Licencee Event Report) и NPRDS (Nuclear Plant Reliability Data System), относящихся к неисправностям измерительных линий. (Формулировки, использованные в таблицах 8.1 и 8.2, отражают содержание оригинальных отчетов, хотя и были отредактированы автором, чтобы сделать их короче. Заметим также, что данные NPRDS приведены без названий АЭС, потому что автор не получил разрешения на их упоминание.)

В главе 9 описывается, как во время работы станции можно использовать метод анализа шумов для испытания в режиме on-line с целью обнаружить закупорки, пустоты и утечки в измерительных линиях давления на АЭС.

8.4.2. Измерение уровня теплоносителя в реакторах BWR

Важно обеспечить точное измерение уровня воды в корпусах реакторов BWR, потому что сигналы уровня воды в корпусе реактора используются для приведения в действие автоматических систем безопасности; кроме того, эта информация необходима оперативному персоналу станции для принятия правильных решений во время и после аварии. Когда на станции происходит быстрый сброс давления, может возникнуть

Таблица 8.1. Примеры неисправностей измерительных линий АЭС (база данных LER)

АЭС	Неисправность	Причина	Устранение неисправности
Закупорки			
Indian Point	Замедленная реакция датчика уровня в парогенераторе	Частичная закупорка измерительной линии из-за осадка	Линия очищена продувкой
	Сильный дрейф датчика уровня в парогенераторе	Закупорка измерительных линий	Линии очищены продувкой
Browns Ferry	Отсутствие показаний в нижней части диапазона дифференциальных датчиков в пяти различных случаях	Установка в измерительные линии демпферов пульсаций	Демонтаж демпферов
Salem	Потеря показаний датчика уровня в баке с борной кислотой	Закупорка измерительных линий борной кислотой	Обе линии очищены и продуты сжатым азотом
H.B.Robinson	Аварийный останов реактора из-за показания заниженного уровня в парогенераторе	Частичная закупорка эталонного участка линии	Продувка измерительных линий
Ginna	Уровень в баке с борной кислотой показан ниже допустимого по регламенту	Неточность показаний из-за частичной закупорки линий	Не указано
Farley	Отказ датчика расхода через парогенератор из-за завышенных показаний	Закупорка в измерительной линии низкого давления	Прочистка линии
Prairie Island	Останов АЭС во время пуска из-за превышения уровня в парогенераторе	Замедленная реакция датчиков уровня в парогенераторе; значительное количество магнетита в линии	Продувка переманного и эталонного участков датчиков уровня
Воздух или пустоты в измерительной линии			
North Anna	Во время пуска показания канала низкого диапазона измерения уровня в парогенераторе на 10% ниже дублирующих каналов и с медленным дрейфом	Наличие воздуха в датчике уровня со стороны измерительной линии низкого давления	Продувка линии

Продолжение табл. 8.1

АЭС	Неисправность	Причина	Устранение неисправности
Zion	Показания канала измерения уровня в компенсаторе объема на 6% ниже дублирующих каналов из-за дрейфа нуля; шесть предыдущих отчетов LER с похожими проблемами	Задержка воздуха в измерительных линиях датчика	Изменен наклон измерительных линий
Brunswick	Ошибочно высокие показания датчика расхода системы очистки воды первого контура (ОВПК), используемый для обнаружения утечки (сигнал утечки)	Воздух, оставшийся в измерительной линии из-за неточности в процедуре испытания времени реакции на превышение расхода в системе ОВПК	Оставшийся воздух удален и процедура испытаний исправлена
Замерзание измерительной линии			
Point Beach	Показания датчика уровня в парогенераторе превышают показания других каналов; два предыдущих отчета LER с той же проблемой	Замерзание измерительных линий из-за неполной термоизоляции и холодной погоды	Улучшение изоляции и включение запасного контура обогрева
Sequoyah	Отказ датчика давления в парогенераторе из-за замерзания измерительных линий (то же случилось с датчиками уровня в баке-хранилище воды для перегрузки и расхода питающей воды)	Замерзание измерительных линий	Линии разморожены и использованы дополнительные изоляция и обогрев
Утечки			
Arkansas Nuclear One	Заниженные показания датчика давления в полости верхнего уплотнения главного циркуляционного насоса; три предыдущих аналогичных отчета LER	Утечка в измерительной линии, отходящей от верхнего уплотнения из-за трещины сварного шва, вызванной вибрацией	Сварной шов заменен; решение проблемы появления трещин, вызванных вибрацией
Browns Ferry	Показания связанного с обеспечением безопасности датчика уровня азота превышают 100%	Утечка в измерительной линии, приводящая к завышению показаний	Починка измерительной линии

Таблица 8.2. **Примеры неисправностей измерительных линий АЭС (база данных NPRDS)**

Неисправность	Причина	Устранение неисправности
Закупорки		
Неудовлетворительная работа датчика уровня	Обнаружен засор посторонним материалом крана на стороне низкого давления	Измерительные линии прочищены (обратной продувкой)
Канал управления возвратом воды вспомогательного контура к вентилю управления сливом показывает 2 бар вместо 8 бар	Измерительные линии закупорены отложениями	Линии очищены продувкой
Во время разогрева станции индикатор давления в парогенераторе «застыл» на низком показателе	Закупорка измерительных линий	Измерительные линии прочищены
Сильно замедленная реакция датчика инжекционного контура безопасности высокого давления	Трубка Бурдона закупорена борной кислотой	Замена трубки Бурдона
Воздух или пустоты в измерительных линиях		
Датчик давления отказал с завышением показаний	Воздух в измерительных линиях	Из полости датчика выпущен воздух
Показание давления на выпуске из инжекционного насоса системы безопасности занижено	Задержка воздуха в измерительной линии	Воздух выпущен и датчик откалиброван
Указатель уровня в парогенераторе ниже, чем показания других каналов	Воздух в эталонном контуре датчика из-за неправильной установки	Контур давления заполнен водой
Показания датчика на струйном рециркуляционном насосе завышены по сравнению с другими индикаторами для насоса	Лишний воздух в сильфонном блоке	Воздух выпущен и датчик откалиброван

помеха точному измерению уровня воды в реакторах BWR. Эта помеха вызывается тем, что неконденсируемые газы могут оказаться растворенными в эталонном участке измерительных линий, ведущих к датчикам уровня; при резком понижении давления до значений ниже, чем 30 бар, растворенные газы могут вновь выделиться, что приведет к неточности в измерениях уровня. Более конкретно, растворенные газы, накапливающиеся в течение нормальной работы станции, могут быстро выделиться и вытеснить воду из эталонного участка, что снизит

уровень воды и приведет к завышенному показанию уровня. К счастью, срабатывание системы безопасности на реакторах BWR происходит при давлениях, превышающих 30 бар, при котором выделяются растворенные газы. Поэтому реактор нормально заглушается до того, как давления понизится до значения, при котором проявляется указанная выше проблема с измерением уровня. Тем не менее важность данной проблемы велика, так как операторы станций пользуются информацией об уровне воды в реакторе во время останова реактора и в другое время, когда давление менее 30 бар.

8.4.3. Совместные измерительные линии

Взаимодублируемые датчики на АЭС иногда используют общую измерительную линию. Проблема общих линий заключается в том, что они могут привести к совместному отказу измерительной системы по одной и той же причине, если на общем участке линии имеется утечка, закупорка или пустоты. К тому же, когда в измерительной линии выходит из строя клапан, такая неисправность может отрицательно повлиять на все датчики, которые обслуживаются этой линией.

Помимо проблем совместного отказа, времена динамической реакции датчиков давления, использующих общую измерительную линию, могут определяться временем реакции наиболее податливого датчика на общем участке. Такой датчик в большинстве случаев является датчиком с самым большим временем реакции. Следовательно, это может привести к тому, что все датчики, использующие общую измерительную линию, будут настолько же медленными, как и наиболее податливый (т.е., самый медленный) датчик.

8.4.4. Использование демпферов

Для снижения влияния шумов в измерительных линиях иногда используют *механические демпферы* (также называемые *демпферами пульсаций*). Источниками шумов могут быть всевозможные явления: от флуктуаций технологического процесса, вибрации измерительных линий, акустических резонансов и резонансов в паропроводах до неисправностей системы управления и резонансов, вызываемых нерастворившимся воздухом в измерительных линиях, заполненных жидкостью.

Механические демпферы снижают влияние шумов, увеличивая время реакции системы измерения давления. Поэтому их следует использовать с осторожностью, особенно в тех случаях, когда время реакции

является важным параметром. Информационное уведомление, выпущенное NRC (Приложение D), подробно описывает ситуацию, при которой пришлось остановить АЭС, потому что использование демпферов в измерительных линиях привело к недопустимо большим временам реакции систем измерения давления.

Альтернативой использованию механических демпферов являются электронные фильтры низких частот. Эти фильтры могут обеспечить любой уровень снижения шумов, но увеличивают время реакции системы таким же образом, как и демпферы. Преимуществом электронных фильтров является то, что они удаляют не только механический или акустический шум, но и любой электронный шум в системе. Еще одно преимущество заключается в том, что их можно спроектировать так, чтобы они обладали точно известной частотой спада своей амплитудно-частотной характеристики (чтобы было известно их время реакции). Недостатком электронных фильтров является то, что в отличие от механических демпферов они не защищают чувствительный элемент датчика давления от механической усталости, вызываемой вибрацией.

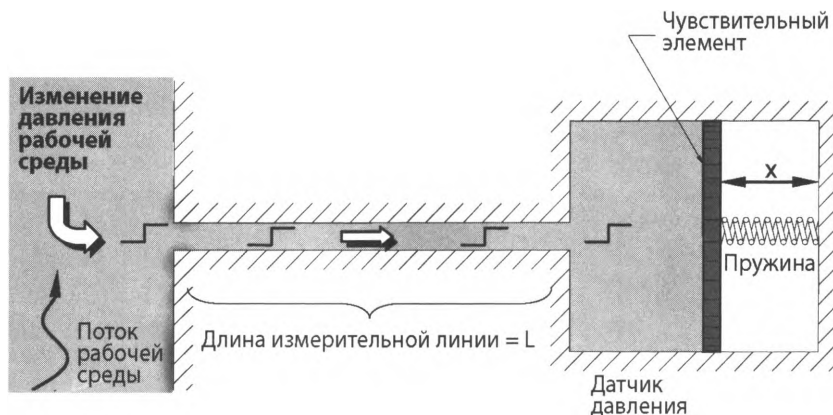
Несколько фирм-производителей выпускают датчики давления со встроенным фильтром, позволяющим ослабить шумы. Регулировка степени демпфирования в этих датчиках должна проводиться с осторожностью, чтобы убедиться, что динамическая характеристика системы измерения давления не ухудшается.

8.5. Динамические характеристики измерительных линий

Систему измерения давления можно представить в виде системы «пружина–масса» (см. рис 8.5). По мере увеличения давления технологического процесса это увеличение передается через измерительную линию, приводя к изменению объема (ΔV_t) в полости датчика. Если изменение давления обозначить ΔP_s , то податливость датчика (C_t) может быть выражена как

$$C_t = \frac{\Delta V_t}{\Delta P_s} \quad (8.1)$$

Динамическое поведение системы «пружина–масса» может быть представлено линейной моделью второго порядка; в этом случае собственная частота системы без демпфирования (ω_n) записывается в виде [18]:



$$\text{Податливость (C)} = \frac{\text{Изменение объема датчика}}{\text{Изменение давления рабочей среды}} = \frac{\text{см}^3}{\text{бар}}$$

Рис. 8.5 Упрощенная модель системы измерения давления и определение податливости

$$\omega_n = \frac{\pi U_a}{2L} \sqrt{\frac{V_{FS}}{\frac{\pi^2}{4} \left[BC_t + B \left(\frac{V_b}{\gamma P_b} \right) + V_t \right] + V_{FS}}} \quad (8.2)$$

где

U_a – акустическая скорость среды измерительной линии

L – длина измерительной линии

V_{FS} – объем рабочей среды в измерительной линии

V_t – объем рабочей среды в датчике

B – модуль объемной деформации рабочей среды

V_b – объем пузыря газа, присутствующего в линии

γ – отношение удельных теплоемкостей газа в пузыре при постоянном давлении и при постоянном объеме (C_p/C_v)

P_b – давление, прикладываемое к пузырю газа.

Кратность демпфирования (ζ) системы может быть выражена как

$$\zeta = \frac{16\nu}{\omega_n d_s^2} \quad (8.3)$$

где

ν – кинематическая вязкость рабочей среды

d_s – внутренний диаметр измерительной линии.

Используя выражения из уравнений 8.2 и 8.3, можно вывести выражение для динамической реакции $x(t)$ для двух сигналов на входе, представляющих особый интерес для АЭС: ступенчатый сигнал и линейный сигнал. Для ступенчатого сигнала динамическая реакция выражается в виде

$$x(t) = K \left[1 - \frac{\omega_n}{\omega_d} e^{-\alpha t} \sin \left(\omega_d t + \arctg \left(\frac{\omega_d}{\alpha} \right) \right) \right] \quad (8.4)$$

где

K – коэффициент усиления системы

ω_d – собственная частота системы с демпфированием ($\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$)

α – коэффициент демпфирования ($\omega_n \zeta$)

t – время в секундах.

Для входного линейного сигнала динамическая реакция выражается как

$$x(t) = Kr \left[t - \frac{2\alpha}{\omega_n^2} - \frac{1}{\omega_d} e^{-\alpha t} \sin \left(\omega_d t + \arctg \left(\frac{\omega_d}{\alpha} \right) \right) \right] \quad (8.5)$$

где r – скорость изменения линейного сигнала.

Уравнения 8.4 и 8.5 представляют собой значения реакции системы измерения давления при отсутствии демпфирования и без учета динамических характеристик таких компонентов датчика как его электронные компоненты, механические соединения вне чувствительного элемента и т.п. В результате, оценки времени реакции, которые получаются при помощи этой модели, окажутся полезными только для отражения влияния длины измерительной линии; закупорки и пустоты могут теоретически повлиять на время реакции системы. В реальной практике, время реакции системы может быть определено лишь экспериментально измерениями в лаборатории или испытаниями на месте установки системы, как это описано в главе 9.

8.5.1. Влияние длины линии на время реакции

Время реакции системы измерения давления возрастает по мере увеличения длины измерительной линии. Это становится очевидным при рассмотрении приведенных в таблице 8.3 результатов для трех типичных для АЭС датчиков давления. Эти результаты рассчитаны на основании расчетных моделей, описанных в предыдущем разделе, используя значения податливости, взятые из описаний фирмы-изготовителя для каждого датчика.

Таблица 8.3. Оценки времени реакции измерительных линий давления в зависимости от длины линии и типа датчика

Длина измерительной линии (м)	Время реакции (с)		
	Barton	Foxboro	Rosemount
Внутренний диаметр линии = 6,35 мм			
15	0,22	0,03	0,11
30	0,31	0,04	0,15
60	0,44	0,06	0,22
90	0,54	0,07	0,27
120	0,63	0,09	0,31
150	0,71	0,11	0,35
Внутренний диаметр линии = 9,53 мм			
15	0,14	0,02	0,07
30	0,20	0,03	0,10
60	0,29	0,04	0,15
90	0,35	0,06	0,18
120	0,41	0,07	0,21
150	0,46	0,09	0,24

Три датчика в таблице – это Barton модель 764, Foxboro (теперь Weed) модель E13DM и Rosemount модель 1153, код диапазона 3.

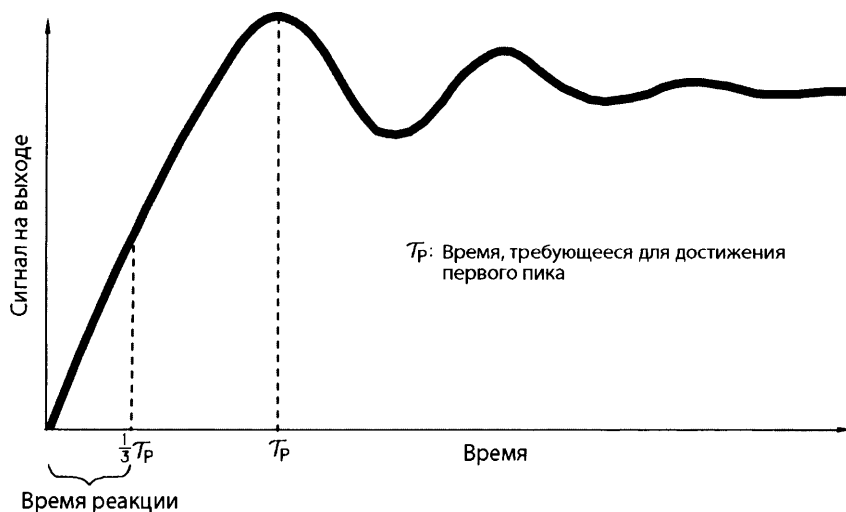


Рис. 8.6. Выходной сигнал системы без демпфирования в ответ на ступенчатый сигнал на входе и определение времени реакции системы

Таблица 8.4. Сравнение расчетных оценок и измеренных значений времени реакции измерительных линий давления в зависимости от длины линии и типа датчика

Длина измерительной линии (м)	Время реакции (с)	
	Теоретическая оценка	Эксперимент
Barton		
30	0,15	0,07
60	0,22	0,15
120	0,31	0,29
Foxboro		
30	0,02	0,02
60	0,04	0,05
120	0,07	0,10
Rosemount		
30	0,02	0,02
60	0,03	0,02
120	0,06	0,06

Примечания.

1. Результаты получены для измерительной линии с внутренним диаметром 12,7 мм
2. Экспериментальные значения получены путем проведения двух серий измерений и вычитания результатов: (1) лабораторных измерений с датчиками Barton, Foxboro (теперь Weed) и Rosemount (код диапазона 7) и измерительными линиями с длиной от 30 до 120 м; и (2) лабораторных измерений с теми же датчиками и измерительными линиями с короткой (пренебрежимо малой) длиной

Результаты вычисления времени реакции, представленные в таблице 8.3, соответствуют одной трети времени, которое требуется модели без демпфирования, чтобы ее выходной сигнал в ответ на ступенчатый входной сигнал достиг первого пика (рис. 8.6). Эти результаты сравниваются в таблице 8.4 с соответствующими результатами, полученными при лабораторных измерениях. Хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными доказывают справедливость моделей, использованных автором для расчета значений времени реакции.

8.5.2. Влияние закупорок на время реакции

Влияние закупорок измерительных линий с различными диаметрами на время реакции типичных датчиков давления показано в таблице 8.5; на рис. 8.7 представлена зависимость времени реакции от диаметра измерительных линий. Результаты показывают, что увеличение времени реакции системы измерения давления при закупорках измерительной линии может моделироваться уменьшением диаметра линии. Расчетные данные были получены при допущении, что закупорка является жесткой и простирается по всей длине измерительной линии. В реальности, однако, закупорки возникают из-за препятствия в каком-то месте линии и обычно не распространяются на всю ее длину. Поэтому влияние реальных закупорок может отличаться от расчетных.

На рис. 8.8 приводятся экспериментальные результаты влияния закупорок измерительных линий на время реакции датчиков давления. Эти данные подтверждают расчетные оценки, представленные в таблице 8.5 и на рис. 8.7.

8.5.3. Влияние пустот на время реакции

Наличие пустот в измерительной линии давления может отрицательно сказаться как на точности, так и на времени реакции системы измерения давления. В таблице 8.6 представлены расчетные времена реакции типичных датчиков давления в зависимости от наличия пустот в измерительной линии. Рассмотрены три случая: отсутствие воздуха в линии, пузырь воздуха длиной 15 см и пузырь воздуха длиной 150 см; при этом длина измерительной линии составляет 7 м, а внутренний диаметр 9,5 мм.

Таблица 8.5. Рассчитанное влияние диаметра измерительной линии (имитирующее влияние закупорок) длиной 15 м на время реакции типичных датчиков давления, используемых на АЭС.

Внутренний диаметр измерительной линии (см)	Время реакции (с)		
	Barton	Foxboro	Rosemount
16	0,086	0,012	0,044
13	0,108	0,014	0,054
10	0,143	0,018	0,072
5	0,216	0,026	0,108
3	0,637	0,050	0,232

Три датчика в таблице – это Barton модель 764, Foxboro (теперь Weed) модель 13DM и Rosemount модель 1153, код диапазона 3.

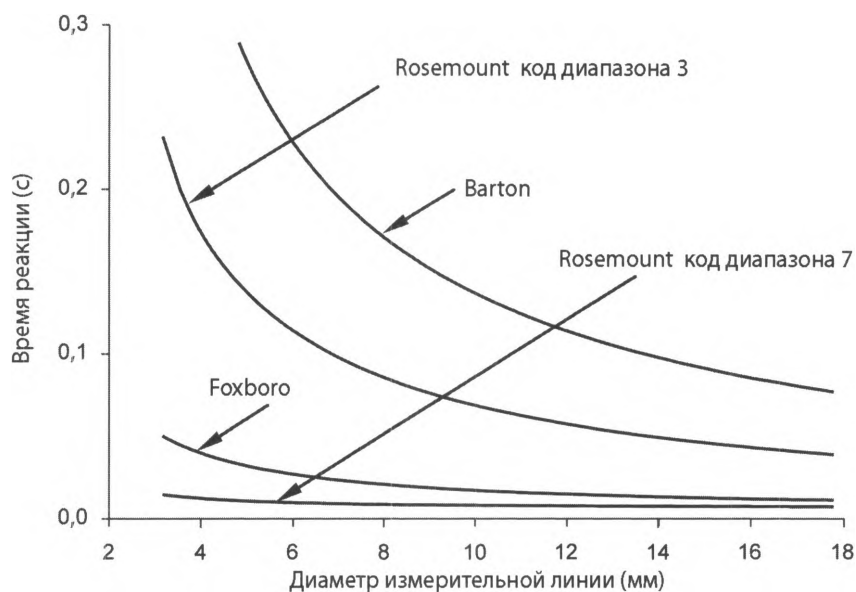


Рис. 8.7 Расчетное время реакции типичных датчиков давления в зависимости от внутреннего диаметра измерительной линии

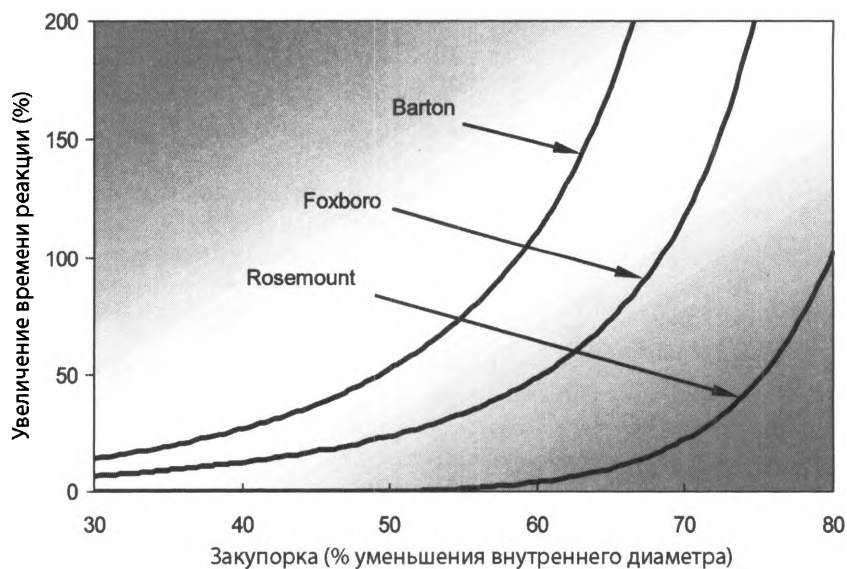


Рис. 8.8. Результаты лабораторных измерений влияния закупорок измерительных линий на время реакции типичных датчиков давления

Таблица 8.6. Влияние наличия пустот в измерительной линии на время реакции типичных датчиков АЭС (расчетные значения)

Фирма-изготовитель	Время реакции (с)		
	Без пустот	Пустота 15 см	Пустота 150 см
Давление = 0,25 бар			
Barton	0,143	0,307	0,880
Foxboro	0,018	0,272	0,868
Rosemount RC 7	0,008	0,271	0,868
Rosemount RC 3	0,072	0,281	0,871
Давление = 15 бар			
Barton	0,143	0,148	0,184
Foxboro	0,018	0,040	0,116
Rosemount RC7	0,008	0,037	0,115
Rosemount RC3	0,072	0,081	0,136

Четыре датчика в таблице – это Barton модель 764, Foxboro (теперь Weed) модель 13DM и два датчика Rosemount, оба модели 1153, коды диапазона RC7 и RC 3.

Результаты расчетов представлены для двух давлений: 0,25 и 15 бар; видно, что влияние наличия пустот на время реакции значительно уменьшается с увеличением давления.

Результаты расчетов, представленные в таблице 8.6, были получены, используя уравнение (8.2), при этом значение V_b (объем пузыря газа, присутствующего в измерительной линии) и другие параметры изменялись так, чтобы соответствовать каждому из рассмотренных случаев.

8.6. Краткие выводы

Датчики давления на работающей АЭС обычно располагаются вдали от технологического оборудования, чтобы свести до минимума влияние на них температуры, вибрации, радиации и других неблагоприятных факторов и облегчить доступ к ним персоналу станции. Измерительные линии (называемые также *импульсными трубками* или *приборными линиями*) используются для соединения рабочей среды технологического процесса с датчиком давления. Чаще всего на один датчик давления приходится две измерительные линии; в штатном режиме расход рабочей среды через измерительные линии отсутствует.

Измерительные линии обычно изготавливают из сплошных толсто-стенных трубок небольшого диаметра, материалом служит нержавеющая сталь. Конструкция линий обеспечивает возможность их теплового расширения и вибрации без деформаций, слив наполняющей жидкости под действием силы тяжести и самопроизвольное удаление газа из линии. Для измерительных линий с жидкостью самоудаление газа обеспечивается наклоном линии, позволяющим газу или воздуху выйти из линии в рабочую среду технологического процесса.

В зависимости от схемы расположения оборудования на АЭС длина измерительных линий варьируется от 10 м до более чем 200 м; средняя длина равна примерно 35 м. Обычно длину линий стараются свести к минимуму, чтобы обеспечить оптимальное время реакции измерительной системы. Измерительные линии, свободные от закупорок и пустот, не увеличивают заметно полное время реакции системы. Однако в измерительных линиях на АЭС отмечались многочисленные случаи закупорок и появления пустот, которые приводили к значительному ухудшению динамической реакции; некоторые примеры таких случаев были рассмотрены в данной главе.

Для применений, не связанных с обеспечением безопасности АЭС, для нескольких датчиков может быть использована общая измерительная линия. Для измерений, относящихся к системе безопасности, однако, каждая измерительная линия обычно соединяется только с одним датчиком с тем, чтобы избежать проблем совместного отказа по одной и той же причине, например, при закупорках, выходе из строя вентилей и т.п.

Еще одной чертой измерительных линий, не относящихся к обеспечению безопасности, является применение механических демпферов (демпферов пульсаций) для снижения шумов технологического процесса. Недостаток этих демпферов заключается в том, что они увеличивают время реакции системы измерения давления.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Измерения динамических характеристик датчиков и их измерительных линий проводят на АЭС по крайней мере по одной из следующих четырех причин:

1. Выполнение требований регламента АЭС или надзорных органов в отношении измерений времени реакции;
2. Поиск неисправностей с целью обнаружить причины нарушения работы датчиков или измерительных линий, включая закупорки, наличие пустот или утечки;
3. Управление процессом старения компонентов и оценка остающегося ресурса работы и надежности систем измерения давления;
4. Разработка объективного графика замены датчиков.

Динамические характеристики датчиков давления и их измерительных линий измеряют на АЭС с помощью метода анализа шумов, как это описывается в данной главе. Этот метод может быть также использован и для оценки динамических характеристик ТДС и термопар.

9.1. Описание метода анализа шумов

Метод анализа шумов основан на изучении естественных флуктуаций, которые обычно присутствуют на выходе датчиков давления во время работы станции. Причиной этих флуктуаций (шума) являются следующие факторы: турбулентция потока воды в системе, вибрации и некоторые другие явления.

Метод анализа шумов представляет собой пассивный способ динамического тестирования систем измерений давления и позволяет определить время реакции как датчика, так и его измерительных линий в результате одного испытания. Данные по этому методу могут быть получены дистанционно во время работы АЭС без нарушения нормальной работы датчиков и без помех для эксплуатации станции, причем с нескольких датчиков одновременно. Применение метода включает 3 этапа, представленных в следующих разделах — получение данных, проверка адекватности и анализ.

9.1.1. Получение данных

Обычный сигнал на выходе датчика давления представляет собой постоянный ток, на который накладывается шум технологического процесса в виде сигнала переменного тока. Шум выделяется из сигнала датчика путем удаления постоянной компоненты сигнала и усиления переменной. Для этого достаточно применить обычное оборудование для преобразования сигнала, включая усилители, фильтры и другие компоненты. После этого сигнал переменного тока оцифровывается, используя высокую частоту дискретизации (например, 1 или 2 кГц), и запоминается для последующего анализа. Анализ может проводиться в режиме реального времени в процессе сбора данных или автономно путем анализа восстановленных данных из запоминающего устройства.

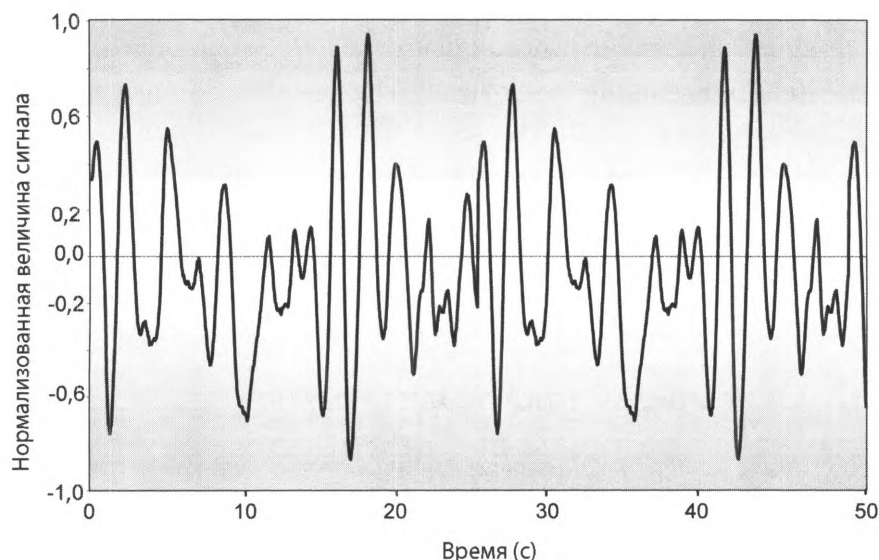


Рис. 9.1. Короткая запись шума датчика давления на работающей АЭС

На рис. 9.1 показан сигнал шума от датчика давления на АЭС, записанный в течение 50 секунд. Для каждого датчика (или для каждой группы датчиков) обычно записывают сигнал шума примерно в течение 1 часа, чтобы использовать эти данные для анализа.

9.1.2. Квалификация данных

Собранные данные должны быть тщательно просмотрены и изучены, прежде чем их можно использовать для какого-либо анализа. Это изучение обычно выполняют при помощи алгоритмов квалификации, включенных в матобеспечение и проверяющих первичные данные на

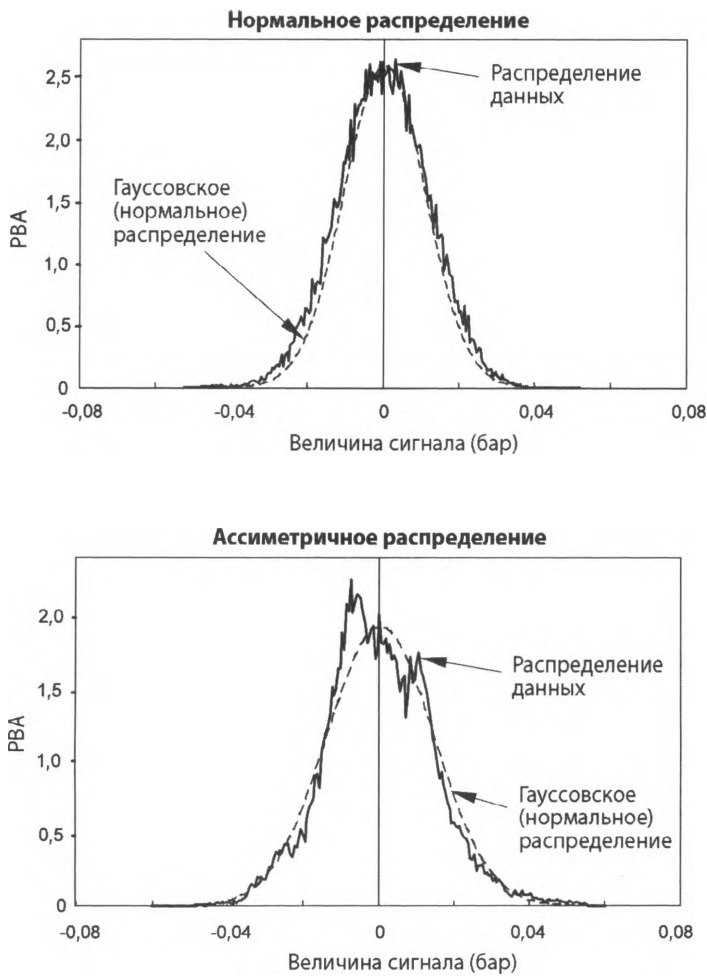


Рис. 9.2. Нормальное и асимметричное РВА сигнала шума от датчиков давления на АЭС

стационарность, линейность и отсутствие аномалий. Например, как это показано на рис. 9.2, строят график распределения вероятностей амплитуд (РВА) и проводят его проверку на отсутствие асимметрии. Асимметрия (нижний график на рис. 9.2) может быть следствием наличия аномалий в собранных данных, включая нелинейность испытуемого датчика.

Верхний график РВА на рис. 9.2 безупречно симметричен по отношению к среднему значению данных шума и точно следует распределению Гаусса (или нормальному распределению, колоколообразной кривой), которое нанесено на РВА.

Помимо изучения графика РВА, для квалификации данных вычисляют и изучают такие параметры, как среднее значение, дисперсия, асимметрия и сглаженность для каждой части исходного массива данных, чтобы убедиться, что там отсутствуют насыщение, влияние внешних факторов, недостающие данные или другие нежелательные аномалии. Любая часть массива данных, в которой обнаружена аномалия, удаляется из зарегистрированного массива, прежде чем он будет подвергнут анализу.

9.1.3. Анализ данных

Данные, характеризующие шум, анализируются в частотном и (или) временном диапазонах. Для анализа данных в частотном диапазоне сначала при помощи алгоритма быстрого преобразования Фурье (или алгоритма, ему эквивалентного) получают спектральную плотность мощности (СПМ) сигнала шума. Затем для этой СПМ подбирают математическую модель системы измерения давления, используя которую и определяют время реакции системы. Графики СПМ для датчиков давления, применяемых на АЭС, принимают различные формы, что зависит от самой станции, от того, каким образом установлен и обслуживается датчик, от технологического режима и от других условий. На рис. 9.3 представлены графики СПМ для трех датчиков, установленных в разных системах АЭС.

Для анализа во временном диапазоне, данные шума обрабатывают при помощи одномерной программы авторегрессивного моделирования, в результате чего получают реакцию на импульс давления (т.е., реакцию на кратковременный скачок давления) и реакцию на ступенчатое изменение давления, из которых рассчитывается время реакции системы давления. Обычно данные шума анализируют как в частотном, так и во временном диапазонах, и результаты осредняют, чтобы получить время реакции системы.

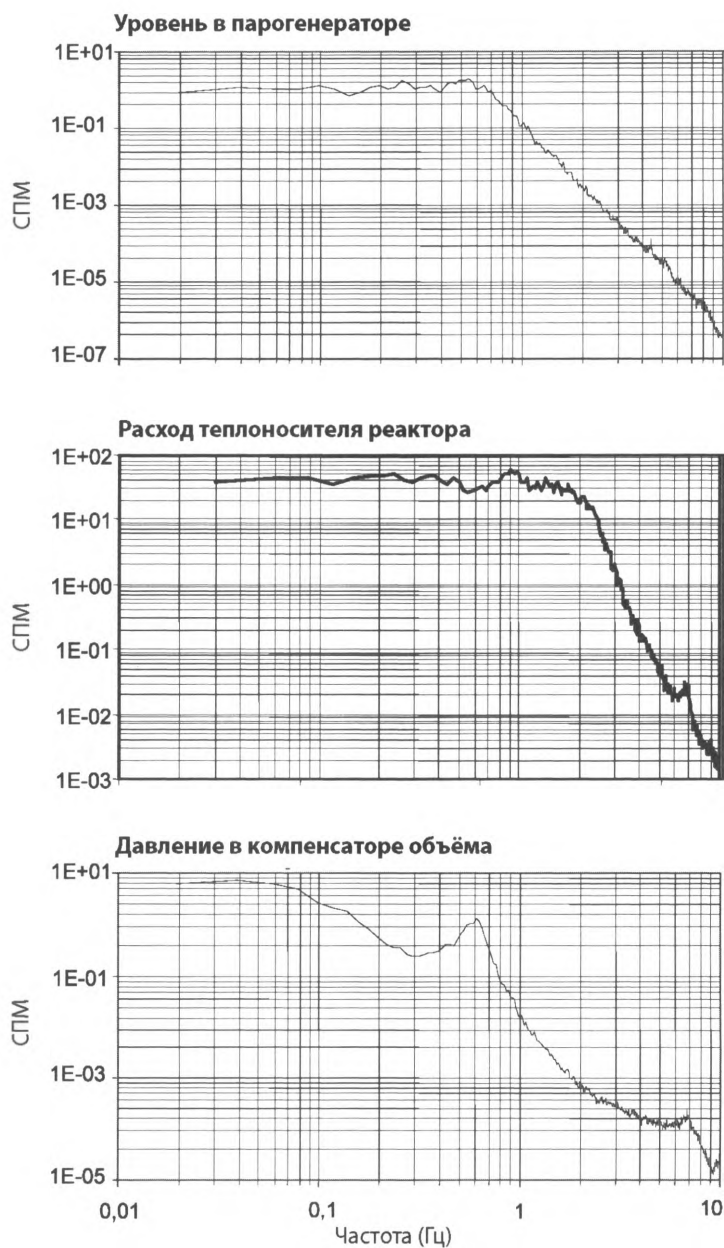


Рис. 9.3. Примеры СПМ для датчиков давления на АЭС

9.2. Метод анализа шумов — допущения

Применимость метода анализа шумов для определения времени реакции систем измерения давления на АЭС зависит от справедливости трех допущений. Эти допущения кратко описаны ниже с упоминанием последствий какого-либо отклонения от них.

1. Шум технологического процесса, воспринимаемый датчиком, является «белым» шумом, что означает плоский спектр или по существу бесконечный диапазон частот. Это, конечно, является идеальной моделью шума. Однако при условии, что спектр шума технологического процесса превышает ширину диапазона частотной характеристики испытываемой системы, метод анализа шумов будет давать результаты приемлемой точности. Если данное допущение не выполняется (т.е. шум процесса имеет более узкий диапазон частот, чем испытываемая система), диапазон шума процесса окажет доминирующее влияние на результаты метода. Следовательно, результаты определения времени реакции методом анализа шумов дадут значение, превышающее реальное время реакции системы измерения давления. Для АЭС это приемлемо, ибо полученная оценка является консервативной.
2. Шум технологического процесса не должен содержать большие резонансы, которые могут сдвинуть частоту излома спектра шума в сторону более высоких частот. Если это допущение не удовлетворяется, то требуется вводить поправки на время проведения анализа данных или при интерпретации результатов; в противном случае, может оказаться, что консервативность оценок времени реакции методом анализа шумов соблюдена не будет.
3. Испытываемый датчик должен иметь линейную или близкую к ней характеристику. В случае датчика с нелинейной характеристикой результаты анализа шумов будут справедливы, если время реакции, представляющее интерес, таково, что оно может быть измерено при помощи испытательного сигнала с малой амплитудой, подаваемого при значении давления, близкого к величине давления, при котором датчик обычно работает на АЭС (построение графика исходных данных, как это описано в разделе 9.1.2, и проверка отсутствия асимметрии являются хорошим способом проверки линейности системы измерения давления).

Опыт показывает, что все эти три допущения обычно выполняются для датчиков давления на АЭС. Исключениями являются датчики давления внутри защитной оболочки реактора, датчики уровня в баке-хранилище воды и другие, у которых параметры технологического процесса имеют очень малые флуктуации или вообще не имеют таковых. Для дистанционного измерения времени реакции этих датчиков был разработан метод, называемый испытанием «розовым шумом». Этот метод описывается в разделе 9.4.

9.3. Метод анализа шумов — валидация

Валидация (применимость) метода анализа шумов для определения времени реакции датчиков давления на АЭС проводится экспериментально (как в лабораторных условиях, так и на станциях), а также при помощи имитационного моделирования [18]. В данном разделе описываются оба эти способа.

Поскольку метод линейного сигнала является стандартным способом для определения времени реакции датчиков давления на АЭС, в испытаниях, описываемых ниже, результаты испытаний, полученные этим методом, использовались в качестве основы для валидации метода анализа шумов.

9.3.1. Валидация в лабораторных условиях

Процедура валидации метода анализа шумов в лабораторных условиях заключалась в следующем:

1. Время реакции датчика измерялось при помощи метода линейного сигнала;
2. Датчик устанавливался в испытательную циркуляционную петлю, которая обеспечивала наличие шума давления с широким частотным диапазоном (ширина диапазона шума контролировалась при помощи быстродействующего эталонного датчика);
3. Переменная составляющая сигнала датчика на выходе регистрировалась в течение отрезка времени до одного часа;
4. Полученные данные подвергались проверке и затем подвергались анализу с целью определить время реакции датчика;
5. Результаты испытания методом линейного сигнала сравнивались с результатами метода анализа шумов.

Описанная выше процедура использовалась для испытаний многочисленных датчиков давления тех типов, которые применяются на АЭС.

В таблице 9.1 представлены результаты испытаний, полученные методами линейного сигнала и анализа шумов. На рис. 9.4 представлены три примера результатов анализа шума в виде графиков СПМ в частотном и временном диапазонах.

Таблица 9.1. Представительные результаты лабораторной валидации метода анализа шумов для датчиков давления ядерного класса

Время реакции (с)		
Метод линейного сигнала	Анализ шумов	Отклонение
Датчики Barton		
0,05	0,09	0,04
0,17	0,20	0,03
0,17	0,25	0,08
0,12	0,15	0,03
0,12	0,20	0,08
0,11	0,15	0,04
0,12	0,18	0,06
Датчики Foxboro		
0,13	0,16	0,03
0,21	0,18	-0,03
0,16	0,13	-0,03
0,09	0,12	0,03
0,29	0,30	0,01
0,25	0,15	-0,10
0,28	0,25	-0,03
Датчики Rosemount		
0,05	0,06	0,01
0,32	0,28	-0,04
0,07	0,05	-0,02
0,10	0,07	-0,03
0,11	0,08	-0,03
0,09	0,08	-0,01
0,09	0,09	0,00
Другие изготовители		
0,21	0,18	-0,03
0,02	0,08	0,06
0,03	0,07	0,04
0,08	0,11	0,03
0,15	0,27	0,12
0,33	0,37	0,04

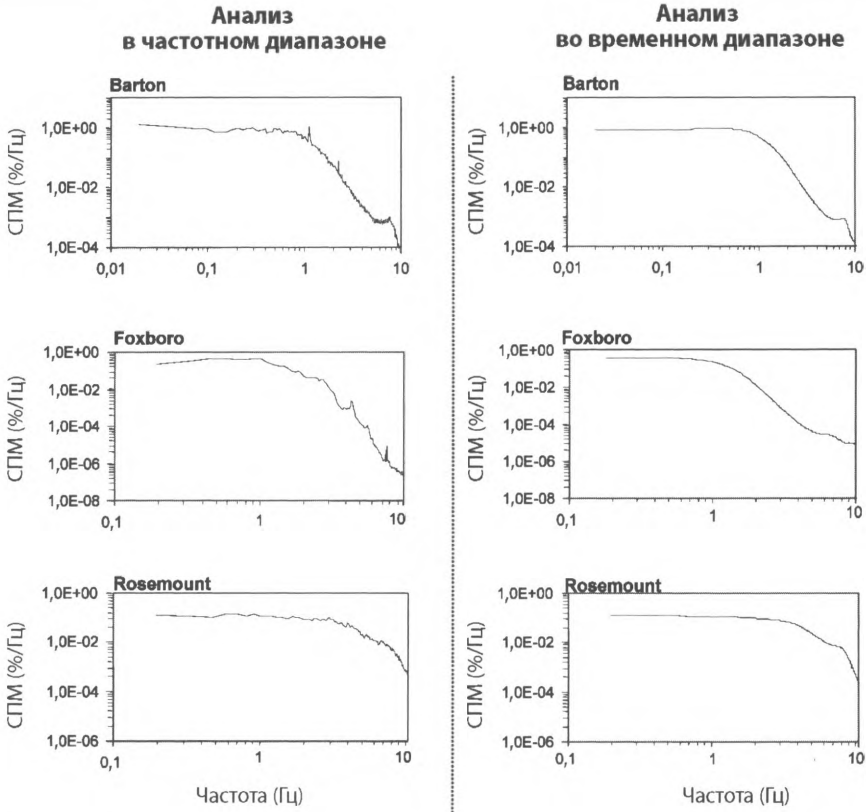


Рис. 9.4. Графики СПМ, полученные при анализе в частотном и временном диапазонах лабораторных данных шума от типичных датчиков давления

В таблице 9.1 для каждого датчика представлена также разница между результатами испытаний методами линейного сигнала и анализа шумов. В идеале, значения времени реакции, полученные этими методами, должны быть идентичны. Однако проблемы воспроизводимости результатов, присущие испытаниям, и другие особенности как метода линейного сигнала, так и анализа шумов не позволяют получать одинаковые результаты для времени реакции. Различия между результатами обоих испытаний, как это видно из таблицы 9.1, составляют менее $\pm 0,05$ с, если не считать нескольких выбросов. Это представляет собой весьма неплохое совпадение, если учитывать все те факторы, которые могут влиять на измерения времени реакции с использованием упомянутых двух методов.

Результаты в таблице 9.1 основаны на испытаниях датчиков давления в той конфигурации, в которой они обычно используются. Для более тщательной валидации метода анализа шумов искусственно ухудшали

Таблица 9.2. Представительные результаты валидации метода анализа шумов для датчиков с умышленно ухудшенным качеством

Время реакции (с)	
Метод линейного сигнала	Анализ шумов
Датчики Barton	
0,11	0,12
0,16	0,27
0,50	0,73
Датчики Foxboro	
0,12	0,15
0,16	0,19
0,33	0,44
Датчики Rosemount	
0,05	0,18
0,35	0,35
0,67	0,68
Другие изготовители	
0,15	0,15
0,19	0,19
0,30	0,35
0,02	0,02
0,04	0,03
0,42	0,50
0,08	0,11
0,12	0,20
0,25	0,35

качество датчиков, чтобы увеличить время реакции; это позволяло проверить надежность выявления деградации динамики датчика. Как и ранее, время реакции таких датчиков было проверено методами линейного сигнала и анализа шумов: результаты представлены в таблице 9.2. Для каждого датчика, представленного в таблице, время реакции измерялось несколько раз по мере ухудшения его качества. Ясно, что увеличение времени реакции датчиков отражено в результатах, полученных методом анализа шумов.

9.3.2. Валидация в условиях АЭС

Было проведено несколько экспериментов по испытанию датчиков давления на АЭС в режиме on-line, используя метод анализа шумов, а вскоре после них – в режиме off-line, используя обычный метод испытания линейным сигналом. Эти эксперименты позволили получить в условиях АЭС результаты, подтверждающие применимость метода анализа шумов (таблица 9.3). Рассмотрение данных, представленных в таблице 9.3, явно демонстрирует достаточное согласие между результатами метода анализа шумов и метода линейного сигнала, за исключением одного датчика (марки Gould PT-505). Было установлено, что этот датчик имел асимметричное РВА, как это видно на рис. 9.5, в то время как РВА двух других датчиков марки Gould (PT-524 и PT 526) на той же станции имеют нормальное (Гауссовское) распределение. РВА могло быть асимметричным из-за нелинейности датчика, недостатков,

Таблица 9.3. Валидация метода анализа шумов в условиях АЭС

Время реакции (с)		
Метод линейного сигнала	Анализ шумов	Отклонение
Датчики Barton		
0,23	0,36	0,13
0,23	0,38	0,15
0,23	0,39	0,16
Датчики Rosemount		
0,08	0,06	–0,02
0,11	0,13	0,02
0,21	0,33	0,12
0,10	0,11	0,01
Датчики Gould		
0,13	0,16	0,03
0,12	0,18	0,06
0,16	0,78	0,62*
Другие изготовители		
0,04	0,05	0,01
0,21	0,21	0,00
0,02	0,02	0,00
0,04	0,03	–0,01

* Этот датчик имеет асимметричное РВА (см. рис. 9.5).

Результаты метода анализа шумов в таблице включают влияние измерительных линий; метод линейного сигнала его не включает. Однако акустическая задержка и влияние длины измерительных линий были для каждого случая оценены и прибавлены к результатам метода линейного сигнала.

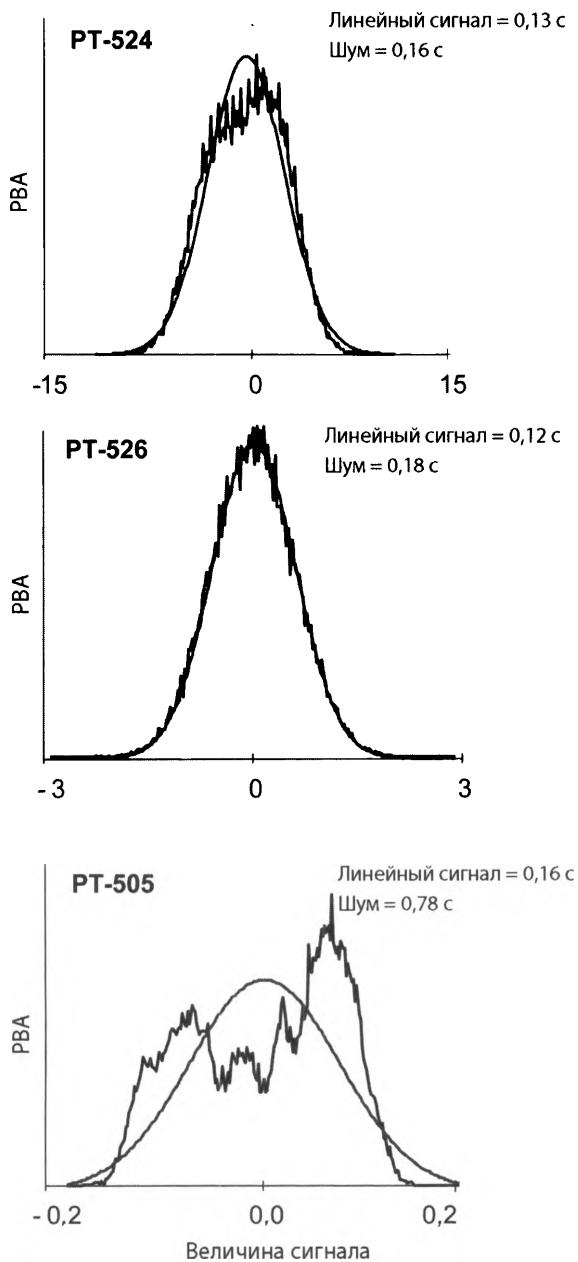


Рис. 9.5. Графики РВА датчиков Gould, полученные при испытаниях на АЭС с реактором PWR (последний датчик, возможно, имеет нелинейную характеристику)

относящихся к данным, шуму или по другим причинам, но важно лишь то, что неверный результат определения времени реакции датчика РТ-505 коррелируется с ненормальностью его РВА. Поэтому следует строить график и изучать РВА любого датчика, чье время реакции измеряется методом анализа шумов, так как РВА может указать на достоверность получаемых значений времени реакции.

Заметим, что различия результатов обоих методов, представленные в таблице 9.3, более значимы для датчиков Barton. Это объясняется тем, что результаты анализа шумов включают влияние измерительных линий, что более заметно для датчиков этого типа.

9.3.3. Валидация программного обеспечения

Валидацию программного обеспечения метода анализа шумов обычно выполняют, используя искусственные аналоговые и цифровые данные шума и расчетные модели. Процедура валидации заключается в следующем:

1. Определение динамической модели для системы измерения давления того типа, который используется на АЭС.
2. Применение в этой модели имитирующих цифровых или аналоговых данных шума. Имитирующие цифровые данные могут быть получены, используя генератор случайных чисел, а аналоговые данные — широкополосный генератор шума.
3. Анализ динамической реакции модели в ответ на ввод имитирующих данных и расчет времени реакции модели с использованием проверяемого программного обеспечения.
4. Сравнение результатов, полученных в п. 3 выше, с фактическим временем реакции модели, рассчитанным, исходя из параметров модели.

В таблице 9.4 представлены результаты валидации для четырех расчетных моделей, которые представляют датчики давления с нормальным и ухудшенным временем реакции. Как и ожидалось, различия между двумя типами результатов пренебрежимо малы (менее 5%), что подтверждает применимость программного обеспечения метода анализа шумов, использованного в этих случаях.

9.3.4. Валидация технических средств

Для валидации технических средств с моделирующего устройства отбирали аналоговые данные, которые проверяли компьютерной программой на их пригодность, и затем анализировали эти данные в частотном

Таблица 9.4. Представительные результаты валидации программного обеспечения для метода анализа шумов

Время реакции (с)		
Расчет	Программное обеспечение метода анализ шумов	Разница
Модель 1		
0,05	0,05	0,00
0,10	0,11	0,01
0,80	0,80	0,00
3,18	3,18	0,00
Модель 2		
0,01	0,01	0,00
0,10	0,10	0,00
1,15	1,14	–0,01
2,32	2,35	0,03
Модель 3		
0,06	0,06	0,00
0,31	0,30	–0,01
0,61	0,64	0,03
2,02	2,04	0,02
Модель 4		
0,23	0,23	0,00
1,73	1,80	0,07
2,02	1,93	–0,09

и (или) временном диапазоне. Для этого процесса использовали устройства, моделирующие датчики давления, с известными временами реакции. Процедура валидации технических средств заключалась в следующем:

1. Разработка моделирующего устройства (например, цепочки RC), имитирующего динамические свойства датчика давления.
2. Измерение времени реакции моделирующего устройства, используя ступенчатый (или линейный) входной сигнал, как это показано на рис. 9.6.
3. Использование генератора сигналов для подачи на устройство случайного шума широкого спектра, как это показано на рис. 9.7.

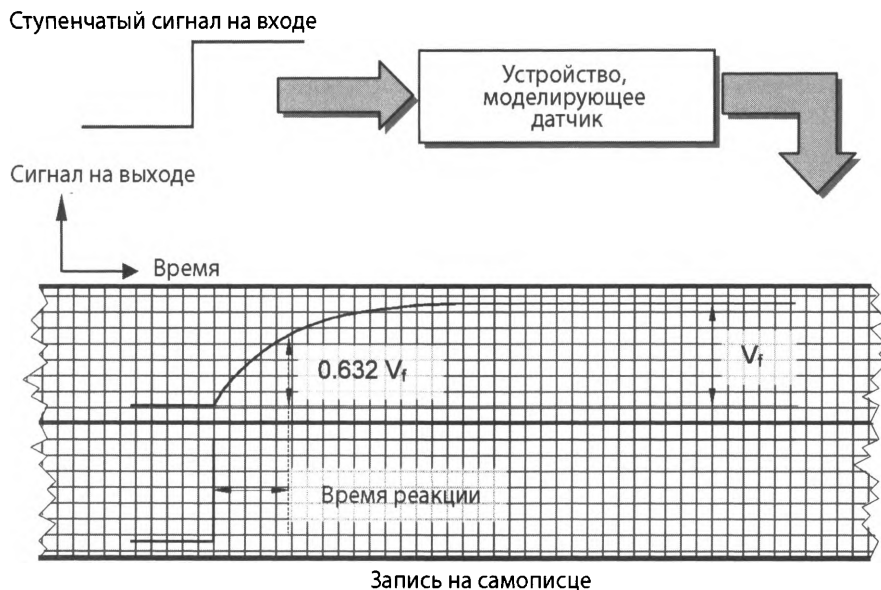


Рис. 9.6. Экспериментальная установка для определения времени реакции устройства, моделирующего систему измерения давления

4. Регистрация выходного сигнала моделирующего устройства и его анализ с целью определения времени реакции устройства.
5. Сравнение результатов п.п. 2 и 4. Оба результата должны быть близки или идентичны.

В таблице 9.5 представлены результаты данной процедуры для четырех моделирующих устройств. Различия между прямыми измерениями времени реакции устройств и результатами применения метода анализа шумов пренебрежимо малы (менее 5%). Систему получения и анализа данных для метода анализа шумов, которая удовлетворительно прошла проверку пригодности программного обеспечения и технических средств, описанную выше, называют квалифицированной для испытаний времени реакции датчиков на АЭС.

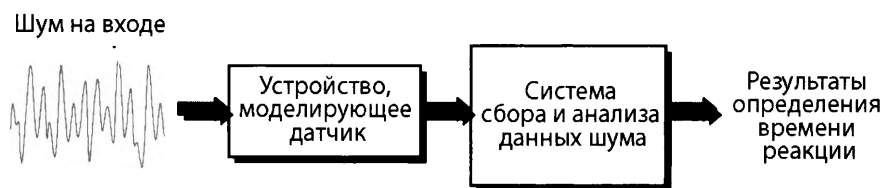


Рис. 9.7. Схема валидации технических средств системы сбора данных по методу анализа шума

Таблица 9.5. Представительные результаты валидации технических средств для метода анализа шумов

Время реакции (с)		
Прямое измерение	Программное обеспечение метода анализ шумов	Разница
Моделирующее устройство 1		
0,03	0,04	0,01
0,26	0,28	0,02
0,30	0,29	-0,01
Моделирующее устройство 2		
0,001	0,001	0,000
0,003	0,004	0,001
0,003	0,005	0,002
Моделирующее устройство 3		
0,05	0,06	0,01
0,30	0,30	0,00
0,54	0,47	-0,07
Моделирующее устройство 4		
0,002	0,002	0,000
0,006	0,005	-0,001
0,006	0,006	0,000

9.4. Метод «розового шума»

Как уже упоминалось в разделе 9.2, для определения времени реакции систем измерения давления на АЭС требуется наличие флуктуаций технологического процесса, характеризующихся широким спектром частот, или так называемого «белого шума». Хотя использование понятия *белый шум* является общепринятым, флуктуации технологического процесса обычно не обладают характеристиками белого шума. Однако это не представляет особой проблемы при условии, что частотный диапазон флуктуаций процесса существенно шире, чем ожидаемый диапазон частотной характеристики испытываемой системы измерения давления.

Для некоторых датчиков давления на АЭС, таких как датчики давления внутри защитной оболочки реактора и датчиках баков-хранилищ воды, флуктуации технологического процесса либо отсутствуют, либо являются недостаточными, чтобы использовать метод анализа шумов

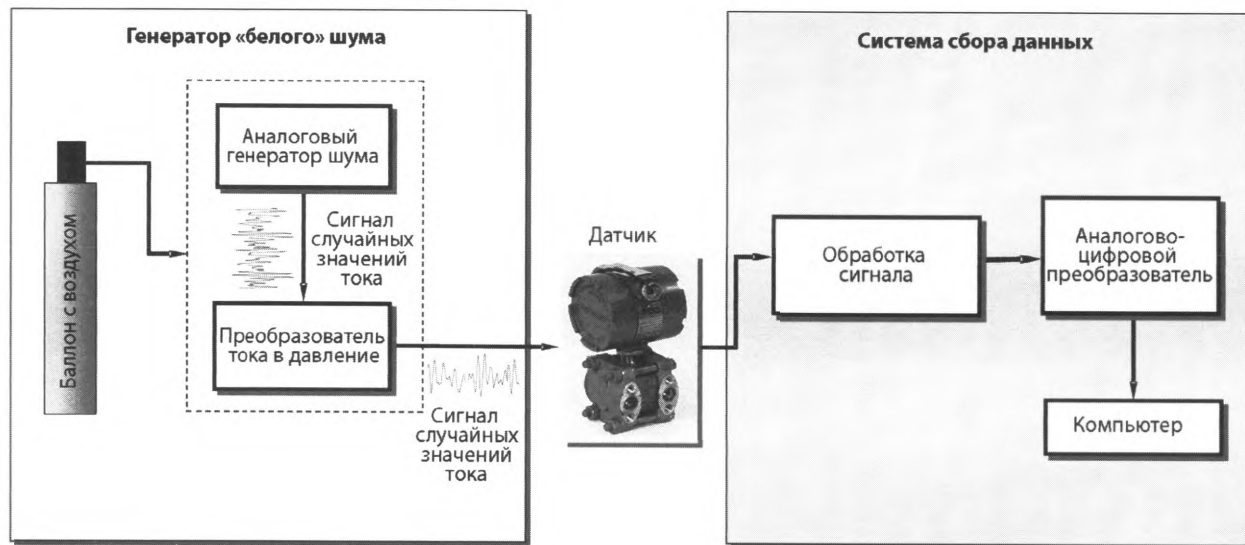


Рис. 9.8. Установка для определения времени реакции датчиков внутри защитной оболочки и других датчиков методом розового шума

Таблица 9.6. Представительные результаты валидации метода розового шума

Номер датчика	Время реакции (с)		
	Метод линейного сигнала	Метод розового шума	Разница
1	0,19	0,22	0,03
2	0,04	0,06	0,02
3	0,47	0,42	–0,05
4	0,48	0,46	–0,02
5	0,08	0,09	0,01
6	0,34	0,33	–0,01
7	0,31	0,33	0,02

для измерения времени реакции датчиков. В этих условиях время реакции таких датчиков определяют либо с использованием обычного метода линейного сигнала, либо с помощью внешнего сигнала, например от генератора шума. Внешний шум вырабатывается при помощи преобразователя ток-давление, на вход которого подается сигнал от генератора случайного шума (рис. 9.8).

Получаемый сигнал давления называют *розовым шумом*, а соответствующий метод измерений называют *методом розового шума*. Преимуществом этого метода является то, что его можно использовать для дистанционного измерения времени реакции датчиков давления (например, находясь снаружи защитной оболочки). Сигнал розового шума подается на датчик обычно через существующие линии, к которым есть доступ снаружи защитной оболочки.

Метод розового шума валидирован для определения времени реакции датчиков давления и успешно используется на АЭС. В таблице 9.6 отражены результаты валидации этого метода в лаборатории.

9.6. Точность метода анализа шумов

Точность метода анализа шумов для определения времени реакции систем измерения давления была установлена экспериментально, используя датчики давления, подобные тем, которые применяются на АЭС. Для каждого датчика время реакции сначала измерялось методом линейного сигнала, а затем – используя метод анализа шумов. При этом точность метода линейного сигнала предварительно определялась в условиях лаборатории. Для этой цели выполнялись, в частности, две серии измерений: в одной проводились измерения при помощи набора

линейных сигналов с разными градиентами (скоростями изменения), а в другой – испытания проводились тремя инженерами на предмет воспроизводимости результатов. В таблицах 9.7 и 9.8 отражены результаты этих измерений в виде разницы между самым малым и самым большим результатом измерения времени реакции для каждого датчика. Результаты, представленные в таблице 9.7, включают измерения с использованием от трех до восьми градиентов линейного сигнала. Результаты в таблице 9.8 отражают испытания на воспроизводимость, выполнявшиеся тремя инженерами (в таблице приводятся их инициалы: МН, РЕФ и КМР). За исключением нескольких выбросов результаты в обеих таблицах характеризуются воспроизводимостью лучше, чем 0,05 секунды, при этом имеется либо незначительная зависимость от градиента линейного сигнала, либо ее вовсе нет.

Таблица 9.7. Примеры результатов лабораторных измерений времени реакции при различных градиентах линейного сигнала

Датчик	Градиент линейного сигнала (бар/с)	Время реакции (с)	Разница (с)
1	0,3, 0,7, 1, 1,5	0,13, 0,13, 0,14, 0,13	0,01
2	0,3, 0,7, 1,5	0,23, 0,21, 0,20	0,03
3	0,2, 0,3, 0,5, 0,7	0,10, 0,13, 0,11, 0,10	0,03
4	0,7, 1, 1,5	0,14, 0,18, 0,17	0,04
5	0,6, 1,2, 2, 2,5	0,08, 0,08, 0,09, 0,09	0,01
6	0,2, 0,4, 0,5, 0,6	0,13, 0,12, 0,12, 0,12	0,01
7	0,1, 0,2, 0,4, 0,7, 1,7, 2	0,04, 0,04, 0,05, 0,05, 0,04, 0,04	0,01
8	1,3, 2,2, 4,2, 6,7, 7,7, 9,1, 10, 120	0,14, 0,21, 0,21, 0,18, 0,18, 0,21, 0,17, 0,18	0,07
9	0,4, 0,6, 0,7	0,15, 0,15, 0,14	0,01
10	2, 2,1, 4, 2,2, 6, 6,7, 7,7, 9,1	0,17, 0,19, 0,19, 0,20, 0,19, 0,19, 0,20, 0,20	0,03
11	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	0,32, 0,30, 0,30, 0,30	0,02
12	4, 8,7, 12,7, 16,7	< 0,01, < 0,01, < 0,01, < 0,01	0,00
13	9, 27, 35	< 0,01, < 0,01, < 0,01	0,00
14	0,3, 1,3, 1,9, 2	0,10, 0,07, 0,07, 0,07	0,03
15	0,2, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7	0,20, 0,16, 0,15, 0,13, 0,12	0,08
16	17, 47, 60, 45, 16, 44, 56	< 0,01, < 0,01, < 0,01, < 0,01, < 0,01, < 0,01	0,00
17	0,1, 0,5, 0,7, 0,8	0,05, 0,07, 0,08, 0,08	0,03
18	0,1, 0,3, 0,4	0,20, 0,17, 0,17	0,03
19	10, 20, 21, 30, 38	0,07, 0,07, 0,07, 0,08, 0,08	0,01
20	0,1, 0,2, 0,3, 0,5	0,39, 0,39, 0,27, 0,27	0,12

Таблица 9.8. Представительные результаты лабораторных испытаний воспроизводимости результатов метода линейного сигнала

Датчик	Инженер-испытатель	Время реакции (с)	Разница (с)
1	MH	0,15, 0,16	0,04
	REF	0,13, 0,13, 0,13, 0,13	
	KMP	0,14, 0,12, 0,15, 0,13	
2	MH	0,23, 0,22	0,04
	REF	0,23, 0,21, 0,20, 0,20	
	KMP	0,19, 0,19, 0,19, 0,19	
3	MH	0,18, 0,16, 0,16	0,08
	REF	0,10, 0,13, 0,11, 0,10	
	KMP	0,12, 0,12, 0,13, 0,11	
4	MH	0,16, 0,16, 0,16	0,04
	REF	0,12, 0,14, 0,14, 0,12	
	KMP	0,14, 0,12, 0,12, 0,12	
5	MH	0,04, 0,04, 0,04	0,01
	REF	0,05, 0,05, 0,04, 0,04	
	KMP	0,05, 0,05, 0,04, 0,04	
6	MH	0,32, 0,32, 0,32	0,03
	REF	0,29, 0,30, 0,32	
	KMP	0,29, 0,30, 0,31	
7	REF	0,08, 0,06, 0,09, 0,09	0,03
8	MH	0,28, 0,28, 0,30, 0,30	0,02
9	KMP	0,28, 0,26, 0,26, 0,23	0,05
10	MH	< 0,01, < 0,01, < 0,01	0,00
11	KMP	< 0,01, < 0,01, < 0,01	0,00
12	REF	0,04, 0,03, 0,04, 0,05, 0,05, 0,05, 0,04, 0,05	0,02

После этого в лаборатории были проведены измерения с целью проверки воспроизводимости результатов метода анализа шумов. В таблице 9.9 отражены результаты этих измерений в виде значений времени реакции, полученных в повторяющихся испытаниях, выполненных в один и тот же или в разные отрезки времени; также показана разница между самым малым и самым большим результатом измерения времени реакции. Так же, как и в случае измерений методом линейного сигнала, воспроизводимость результатов измерения методом анализа шумов, представленных в таблице 9.9, лучше, чем 0,05 с, если не считать пары выбросов. Это вполне приемлемо, учитывая потенциальные факторы, которые могут оказывать влияние на результаты анализа шумов.

Таблица 9.9. **Воспроизводимость результатов метода анализа шумов, полученных в лабораторных испытаниях**

Датчик	Дата испытания	Измеренное время реакции (с)	Разница (с)
1	Неделя 1	0,11, 0,12, 0,16, 0,16	0,06
	Неделя 3	0,17, 0,16, 0,17, 0,17	
2	Неделя 1	0,16, 0,16, 0,21, 0,23	0,07
	Неделя 3	0,16, 0,16, 0,17, 0,17	
3	Неделя 1	0,15, 0,17, 0,14	0,02
	Неделя 3	0,14, 0,14	
4	Неделя 1	0,13, 0,13, 0,13, 0,13	0,02
	Неделя 3	0,14, 0,12, 0,12, 0,14	
5	Неделя 1	0,32, 0,27, 0,28, 0,28	0,10
	Неделя 3	0,23, 0,34, 0,33, 0,24	
6	Неделя 1	0,05, 0,05, 0,06	0,03
	Неделя 3	0,03, 0,04, 0,06, 0,04	
7	Неделя 1	0,07, 0,07	0,01
	Неделя 3	0,07, 0,08	
8	Неделя 1	0,21, 0,19, 0,21, 0,21	0,05
	Неделя 3	0,22, 0,22, 0,24, 0,24	
9	Неделя 1	0,26, 0,20, 0,25	0,06
	Неделя 3	0,26, 0,25, 0,26	
10	Неделя 1	0,10, 0,11, 0,12, 0,11	0,02
11	Неделя 1	0,17, 0,17, 0,18, 0,18	0,01
12	Неделя 1	0,09, 0,09, 0,10, 0,08	0,02
13	Неделя 1	0,23, 0,22, 0,22, 0,22	0,01
14	Неделя 1	0,33, 0,35, 0,36, 0,38	0,05

В дополнение к сказанному, результаты, представленные в таблицах 9.1, 9.2 и 9.3, позволяют определить точность метода анализа шумов. В частности, эти результаты отражают большое число испытаний, что привело к возможности сделать следующие выводы [18]:

- 79% результатов измерения времени реакции методом анализа шумов отличаются на $\pm 0,05$ с или менее от результатов измерений методом линейного сигнала, выполненных с теми же датчиками и в тех же условиях.
- 16% результатов измерения времени реакции методом анализа шумов отличаются на величину между $\pm 0,05$ и $\pm 0,10$ с от результатов измерений методом линейного сигнала, выполненных с теми же датчиками и в тех же условиях.

- 5% результатов измерения времени реакции методом анализа шумов, отличаются на $\pm 0,10$ с от результатов измерений методом линейного сигнала, выполненных с теми же датчиками и в тех же условиях.

Основываясь на совокупности данных (они представлены выше), полученных в атомной энергетической отрасли, был сделан вывод о том, что метод анализа шумов позволяет определить время реакции систем измерения давления с точностью лучше, чем 0,10 с.

9.6. Опыт применения метода анализа шумов на АЭС

Измерения времени реакции датчиков давления с использованием метода анализа шумов выполнялось на АЭС с начала 1980-х годов. В результате собрана база данных со значениями времени реакции датчиков и записями исходной информации, графики СПМ и наблюдения, представляющие интерес. Некоторые примеры разбираются в этом разделе.

На рис. 9.9 представлены графики СПМ при испытаниях методом анализа шумов, проведенных на реакторах PWR с двумя, тремя и четырьмя петлями теплоносителя, а также на реакторе BWR. Для каждого из этих случаев приводятся три СПМ: для датчика давления, уровня и расхода.

На ряде АЭС измерения методом анализа шумов проводились неоднократно для проверки воспроизводимости результатов. На рис. 9.10 показаны два СПМ для датчика уровня в парогенераторе трехпетлевого реактора PWR; эти два измерения проводились с интервалом примерно в три года. Представленные результаты практически идентичны, что свидетельствует об очень хорошей воспроизводимости и о том, что реакция датчика не изменилась со временем.

В другом случае, проводились одновременные испытания двух взаимодублируемых датчиков, получавших один и тот же сигнал уровня в парогенераторе реактора PWR с четырехпетлевым контуром охлаждения; полученные графики СПМ представлены на рис. 9.11. Очевидно, что у одного из датчиков реакция значительно быстрее, чем у другого (примерно на порядок величины), что довольно странно, так как от взаимодублируемых датчиков обычно ожидают сопоставимые скорости реакции. В этом конкретном случае два датчика были моделями двух различных фирм-изготовителей и, вероятно, были установлены

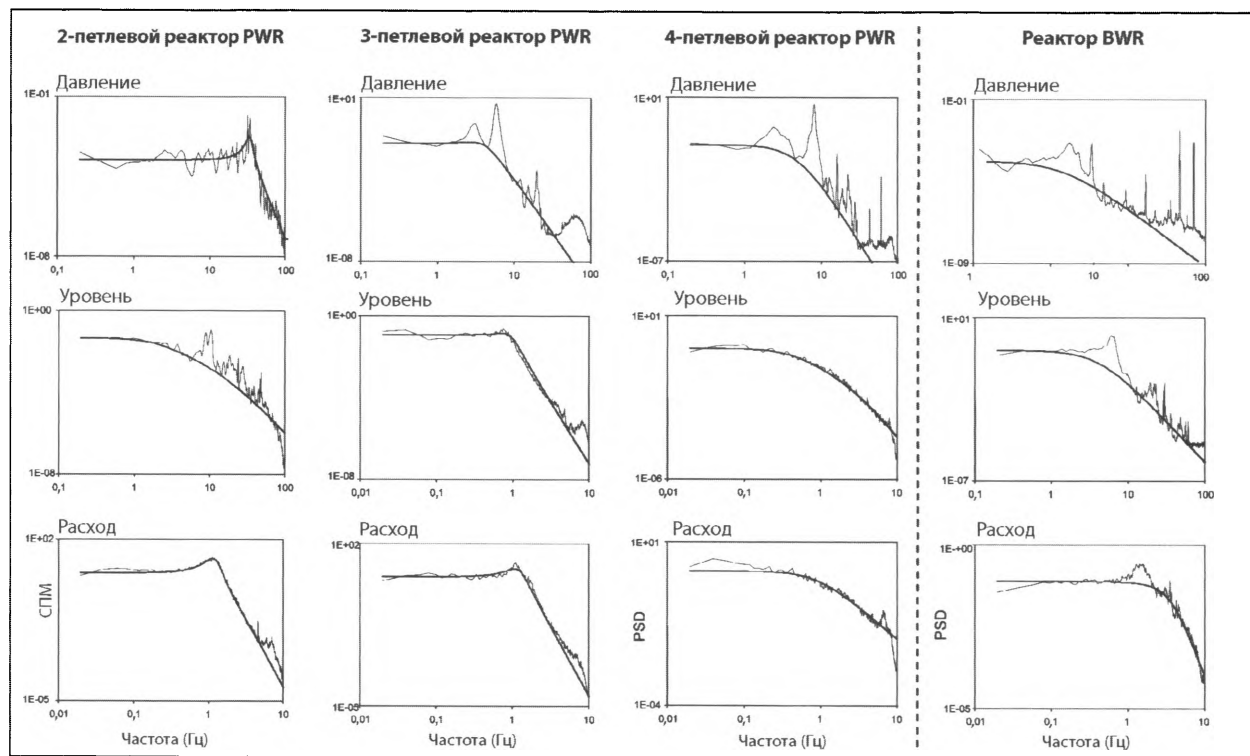


Рис. 9.9. Примеры типичных СПМ датчиков давления, уровня и расхода на реакторах PWR и BWR

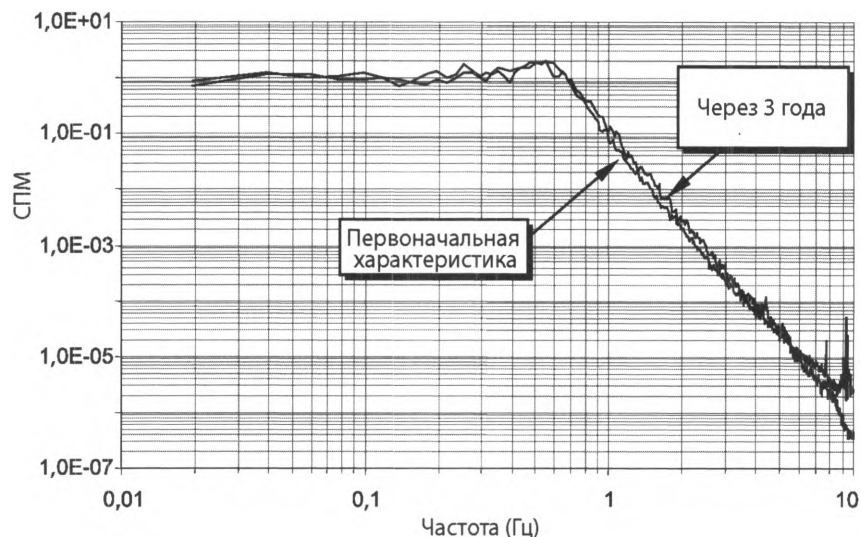


Рис.9.10. Графики СЧМ датчика давления на АЭС, построенные по измерениям, проведенным с интервалом в три года

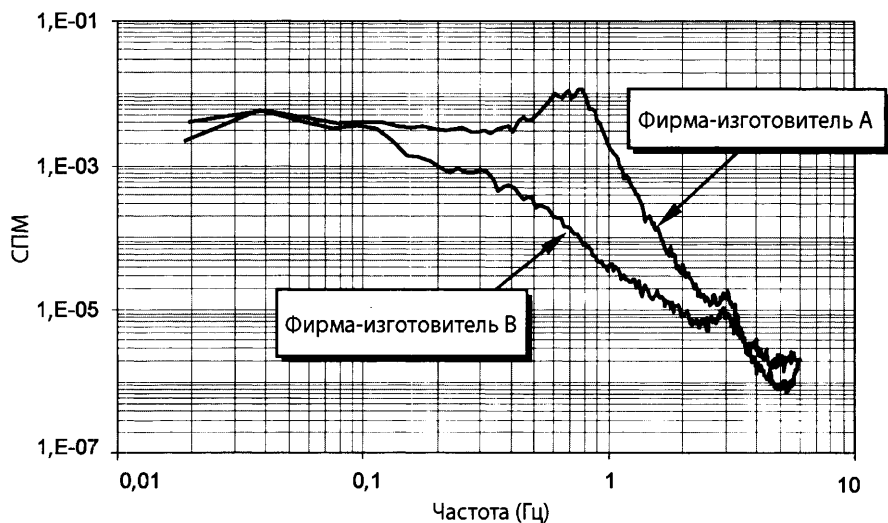


Рис. 9.11 Графики СЧМ двух взаимодублирующих датчиков уровня в парогенераторе реактора PWR с четырехпетлевым контуром охлаждения

без учета того, что они могут иметь сильно различающиеся времена реакции. Такого рода разница в скоростях реакции также заметна во взаимодублируемых датчиках, когда в измерительной линии имеется закупорка, но это не явилось причиной в случае рис. 9.11.

9.7. Потеря масла в датчиках давления на АЭС

9.7.1. Описание проблемы

В конце 1980-х годов обнаружилось, что в некоторых датчиках давления Rosemount, использовавшихся на АЭС, происходила утечка силиконового масла из чувствительных модулей. Силиконовое масло применяется для передачи сигналов давления от изолирующей диафрагмы к чувствительной, которая находится в центре чувствительного модуля. Утечка масла, таким образом, отрицательно влияет как на работу датчика в стационарном режиме (из-за калибровки), так и на его динамические свойства. Проблема утечки масла из датчиков Rosemount вызвала серьезную озабоченность в атомной отрасли и стала темой нескольких документов, выпущенных фирмой Rosemount и Комиссией по ядерному регулированию (NRC) США. Документы фирмы Rosemount были подготовлены в форме технических бюллетеней, которые широко распространялись в отрасли, чтобы помочь решению проблемы утечек масла. Документы NRC содержали рекомендации регулирующего органа в отношении того, как следует решать эту проблему. В Приложении Е приводятся два примера документов NRC, выпущенных на тему проблемы утечек масла.

На рис. 9.12 показана реакция двух датчиков расхода фирмы Rosemount, установленных на АЭС Millstone, блок 3, с реактором PWR,

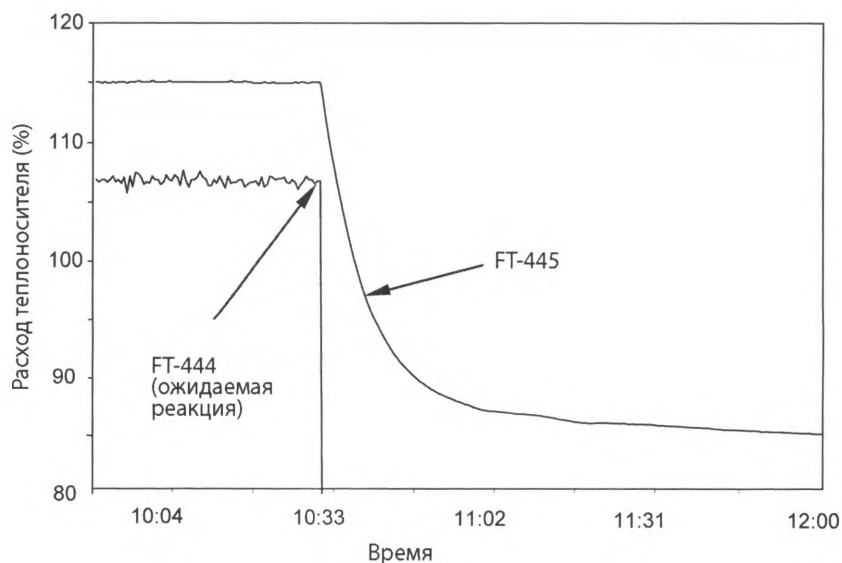


Рис. 9.12 Динамическая реакция двух датчиков Rosemount во время останова АЭС Millstone, блок 3



Рис. 9.13 Сигналы шума от исправного и неисправного датчиков Rosemount, полученные при испытаниях на работающей АЭС

на останов реактора из-за отключения главного циркуляционного насоса. Заметно, что один датчик (FT-444) быстро реагирует на уменьшение расхода, как это и ожидалось, а другой (FT-445) реагирует крайне медленно. Позднее подтвердилось, что характеристики датчика FT-445 ухудшились из-за неисправности, заключающейся в утечке масла. Фактически именно данные, представленные на рис. 9.12, привели к тому, что была обнаружена проблема утечки масла в датчиках давления Rosemount.

На рис. 9.13 представлены данные шума от исправного и от неисправного (из-за утечки масла) датчиков Rosemount модели 1153, которые применялись для одной и той же цели на работающей АЭС. Как и ожидалось, амплитуда сигнала шума от неисправного датчика гораздо меньше, чем от исправного.

На рис. 9.14 приведены схематические изображения чувствительного модуля датчиков Rosemount в нормальном состоянии, в условиях подачи на него чересчур высокого давления и при частичной потере датчиком масла. Известно, что масло вытекает из чувствительного модуля через область контакта стекла и металла, как это представлено на рис. 9.15.

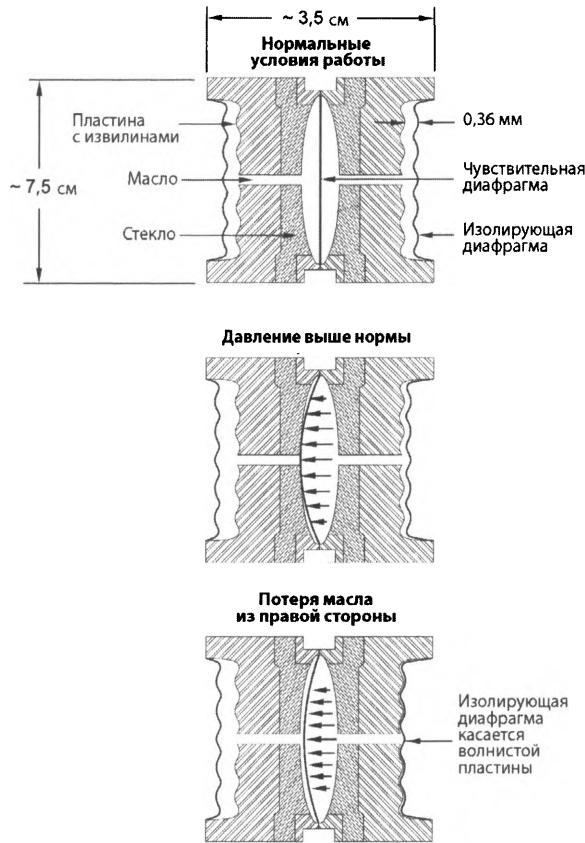


Рис. 9.14. Чувствительный модуль датчиков Rosemount в исправном состоянии и в условиях потери датчиком масла

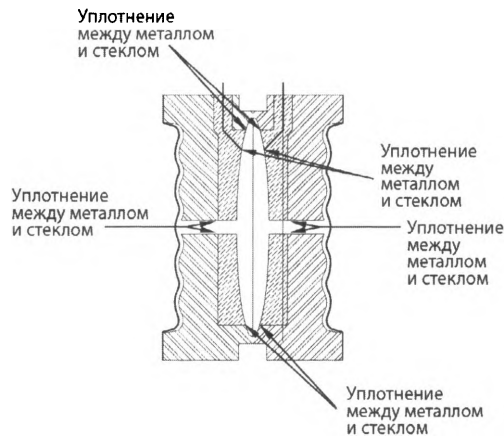


Рис. 9.15 Места, где возможна утечка масла из чувствительного модуля датчика Rosemount

9.8. Диагностика потери датчиком масла

После того как в конце 1980-х годов была выявлена проблема утечки масла из датчиков Rosemount, автор этой книги и его коллеги по корпорации AMS разработали метод диагностики путем анализа шумов с целью обнаружения потери масла. Метод включал в себя вычисление моментов данных шума от второго до пятого и отношения этих моментов, используя шумы, расположенные выше и ниже среднего значения сигнала. Первым моментом шума является его среднее значение, вторым моментом – дисперсия, третьим – асимметрия (перекося) и т.д. В таблице 9.10 представлен пример индикаторов шумовой диагностики для четырех датчиков уровня в парогенераторе реактора PWR, обозначенных как LT518, 528, 538 и 548. В таблице также указаны нормальные значения индикаторов. Заметим, что значения индикаторов для датчика LT528 сильно отличаются от значений для остальных датчиков. Впоследствии этот датчик был демонтирован и отправлен на фирму Rosemount, где обнаружилось, что его неисправность была вызвана утечкой масла из чувствительного модуля. Описанное выше и другие исследования в этой области позволили сделать вывод о том, что метод анализа шумов может быть полезен как способ диагностики потери датчиками масла. Следует отметить, что причина возникновения проблемы утечки масла из датчиков Rosemount была обнаружена и ее решение было найдено изготовителем очень быстро, поэтому атомная промышленность не испытала каких-то нежелательных последствий. Так как проблему удалось решить на ранней стадии, диагностика потери масла датчиками с использованием метода анализа шумов не нашла широкого применения на АЭС.

9.8.1. Влияние потери масла на линейность датчика

Потеря масла не только ухудшает статическую и динамическую реакцию датчика, но может привести к нелинейности его характеристики.

Таблица 9.10. Пример результатов диагностики потери масла датчиками

Индикатор диагностики	Нормальное значение	Измеренные значения индикаторов диагностики			
		LT518	LT528	LT538	LT548
Асимметрия	0,0	0,02	0,23	0,08	0,05
5-й момент	0,0	0,07	2,12	0,70	0,36
Дисперсионное отношение	1,0	1,03	1,25	1,09	1,06
Асимметрическое отношение	1,0	1,00	1,06	1,01	1,02
Отношение 5-го момента	1,0	1,00	1,21	1,04	1,06

Таблица 9.11. Результаты измерений времени реакции датчиков Rosemount, проводившихся с целью демонстрации влияния потери масла на линейность датчика

Установка давления	Время реакции (с)	
	Линейный сигнал с положительным градиентом	Линейный сигнал с отрицательным градиентом
Исправный датчик		
Низкая	0,12	0,13
Средняя	0,12	0,13
Высокая	0,15	0,13
Неисправный датчик		
Низкая	0,23	171,0
Средняя	0,25	19,0
Высокая	0,25	1,1

В таблице 9.11 представлены результаты испытаний методом линейного сигнала, полученные для исправного и для поврежденного (из-за потери масла) датчиков Rosemount модели 1153. Испытания линейным сигналом были проведены как с возрастающим сигналом, так и с убывающим, при трех заданных значениях давления. Направление изменения сигнала не оказывает влияния на исправный датчик, в то время как поврежденный датчик не только обладает замедленной реакцией, но его показания также зависят от направления изменения линейного сигнала: в частности, при убывающем линейном сигнале его время реакции очень велико при низком заданном значении давления и уменьшается более, чем на два порядка величины при высоком.

9.8.2. Потеря масла в датчиках, изготовленных не фирмой Rosemount

В некоторых датчиках давления для АЭС, поставляемых другими производителями, также применяется силиконовое масло, но в них оно не используется для передачи сигнала давления. Например, в некоторых датчиках фирмы Barton масло применяется в механической системе датчика и, когда происходит его утечка (что иногда случается), это обычно не ухудшает работу датчика. На рис. 9.16 показано, где может происходить утечка масла из датчика Barton, а в таблице 9.12 представлены результаты измерения времени реакции датчика Barton модели 764 при различных объемах утечки масла. Для проведения таких лабораторных испытаний масло из датчика удаляли искусственным путем, после чего измеряли время реакции датчика. Полученные результаты показали, что утечка масла не всегда приводит к значительному

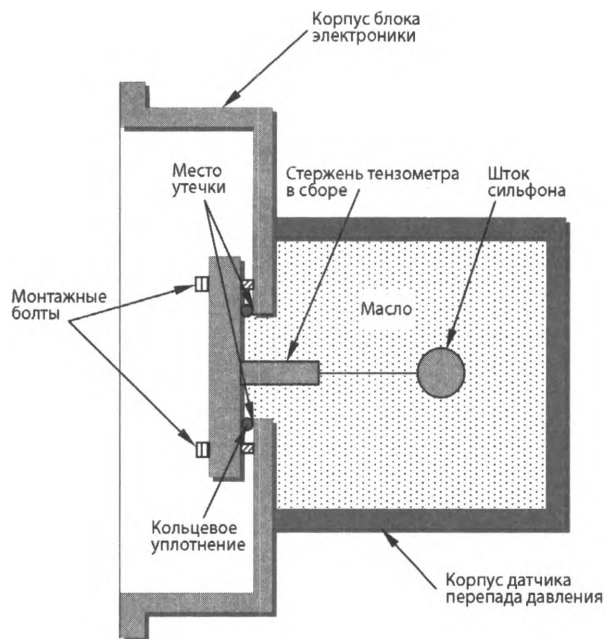


Рис. 9.16 Чувствительный модуль датчика Barton с кольцевым уплотнением, где может произойти утечка масла

ухудшению работы или линейности датчика. В таблице 9.12 представлены также результаты определения времени реакции датчиков Foxbogo и Tobar с полным содержанием масла и с его полной потерей.

Таблица 9.12. Результаты лабораторных измерений времени реакции датчиков давления (для исправных датчиков и датчиков с утечкой масла)

Степень потери масла	Время реакции (с)	
	Возрастающий линейный сигнал	Убывающий линейный сигнал
Датчик Barton модели 764		
0%	0,19	0,19
50%	0,16	0,16
75%	0,12	0,12
100%	0,10	0,11
Датчик Foxbogo модели E13DM		
0%	0,17	0,12
100%	0,12	0,08
Датчик Tobar модели 32DP		
0%	0,17	0,18
100%	0,11	0,12

9.9. Замедление реакции датчика

Замедление реакции датчиков давления на АЭС со временем несомненно, но данная проблема не столь серьезна, как для ТДС. И наоборот, дрейф калибровки доставляет для датчиков давления больше неприятностей, чем для ТДС. На рис. 9.17 представлены итоговые результаты исследовательского проекта, в котором изучалось влияние старения датчиков на калибровку и на время реакции ряда датчиков давления ядерного класса [18]. Ясно, что отрицательное влияние старения сказывается сильнее на калибровке датчиков давления, чем на их времени реакции.

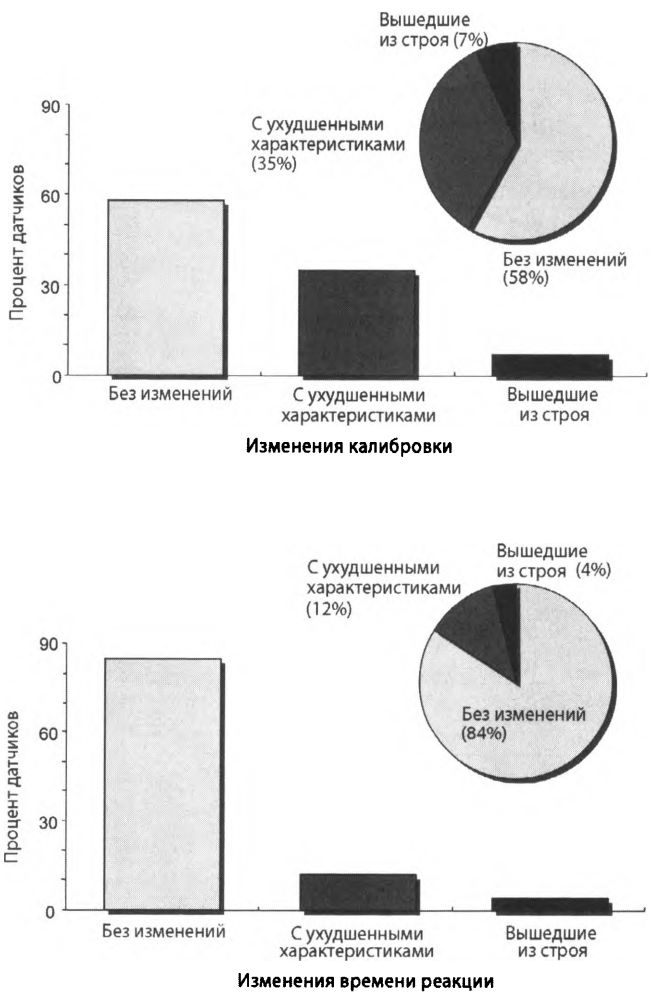


Рис. 9.17 Результаты исследований влияния искусственного старения датчиков давления АЭС на их характеристики

В таблице 9.13 представлены результаты определения времени реакции методом анализа шумов для 16 датчиков в течение пяти лет. Ухудшение времени реакции примерно на 30% после 36 месяцев работы было отмечено лишь для одного датчика и впоследствии было обнаружено, что это ухудшение было вызвано не датчиком, а закупоркой измерительной линии. Эти данные согласуются с опытом, накопленным в атомной промышленности, который свидетельствует о том, что ухудшение времени реакции датчиков давления связано чаще с закупорками измерительных линий, чем с ухудшением свойств самого датчика.

Таблица 9.13. Типичные результаты анализа тенденций в отношении времени реакции группы датчиков давления, применяемых на АЭС

Номер датчика	Первоначальное значение	Время реакции (с)			
		18 месяцев спустя	36 месяцев спустя	48 месяцев спустя	60 месяцев спустя
AE-LT-0011A	0,36	0,41	0,43	0,44	0,44
AE-LT-0012A	0,38	0,42	0,43	0,43	0,43
AE-LT-0013A	0,45	0,43	0,45	0,47	0,41
AE-LT-0014A	0,43	0,41	0,44	0,47	0,43
AE-LT-0021A	0,41	0,45	0,43	0,43	0,42
AE-LT-0022A	0,39	0,42	0,42	0,43	0,42
AE-LT-0023A	0,44	0,49	0,47	0,46	0,43
AE-LT-0024A	0,46	0,48	0,44	0,66	0,41**
AE-LT-0031A	0,39	0,42	0,41	0,41	0,40
AE-LT-0032A	0,43	0,46	0,44	0,48	0,42
AE-LT-0033A	0,45	0,48	0,44	0,46	0,44
AE-LT-0034A	0,45	0,47	0,42	0,45	0,41
AE-LT-0041A	0,38	0,44	0,40	0,41	0,44
AE-LT-0042A	0,44	0,42	0,43	0,45	0,41
AE-LT-0043A	0,43	0,44	0,42	0,41	0,40
AE-LT-0044A	0,45	0,44	0,41	0,42	0,40

** Ухудшение времени реакции датчика между 36 и 48 месяцами его работы. Неисправность была ликвидирована во время перерыва в работе по достижении 48 месяцев.

В таблице 9.14 представлены несколько примеров, полученных из базы данных NPRDS (Nuclear Plant Reliability Data System) на предмет отказов датчиков давления на АЭС. Очевидно, что ухудшение времени реакции, хотя оно и не является доминирующим фактором, послужило причиной отказов, которые в течение ряда лет отмечались в атомной промышленности.

Таблица 9.14. Примеры неисправностей датчиков давления на АЭС (данные получены из базы NPRDS)

Неисправность	Причина	Устранение неисправности
Во время снижения давления датчик давления отмечал изменение давления с большим запозданием и показывал значения, заниженные на 50 бар	Несправный осциллятор, силовой двигатель и обмотка детектора	Заменяли силовой двигатель, обмотку детектора и осциллятор
Замедленная реакция датчика в верхней части его диапазона	Неизвестна	Датчик заменили
Неудовлетворительные результаты испытания дифференциального датчика давления на главном паровом трубопроводе	Выход из строя платы усилителя датчика	Заменяли плату усилителя
Датчик уровня при послеаварийной потере теплоносителя давал завышенные показания и не отвечал на различные входные сигналы	Чувствительный модуль датчика вышел из строя из-за утечки его наполнителя	Датчик заменили
Замедленная реакция датчика расхода теплоносителя реактора	Трещина диафрагмы из-за износа	Датчик заменили
Датчик уровня при послеаварийной потере теплоносителя давал неверные показания	Чувствительный модуль датчика вышел из строя из-за утечки масла	Датчик заменили
Утечка на обратной стороне чувствительного модуля датчика расхода теплоносителя реактора	Неизвестна	Заменяли сильфонный блок датчика
Утечка силиконового масла из модуля измерения перепада давления в корпус электронного блока	Чересчур глубокий паз для кольцевого уплотнения	Датчик заменили; проверили все датчики этого типа на предмет утечки масла
В датчике верхнего уровня в корпусе реактора обнаружилась утечка силиконового масла из модуля измерения перепада давления в корпус электронного блока	Силиконовое масло по ошибке оставили в корпусе электронного блока во время сборки датчика	Датчик заменили

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В РЕЖИМЕ ON-LINE

В главе 9 упоминалось, что метод анализа шумов позволяет определить динамическую реакцию не только датчика давления, но и его измерительной линии, т.е. при измерении времени реакции этим методом результаты включают в себя любую задержку, которая обусловлена длиной измерительной линии, и учитывают автоматически влияние любых закупорок или пустот в ней [20]. Эти положения ниже подтверждаются примерами.

10.1. Закупорки измерительных линий

Закупорки в измерительных линиях могут возникать по целому ряду причин, включая накопление загрязнений, затвердевание бора и неточное выравнивание или установка отсекающих и уравнивающих вентилей. В случае применения метода анализа шумов влияние всех этих закупорок учитывается при измерении времени реакции датчиков давления автоматически. Это подтверждается результатами измерений в лаборатории, представленными в таблице 10.1, где отражены результаты измерений методами линейного сигнала и анализа шумов, выполненных в одинаковых условиях. Схема оборудования для испытаний и фотография установки представлены, соответственно, на рис. 10.1 и 10.2. Процедура испытаний заключалась в следующем:

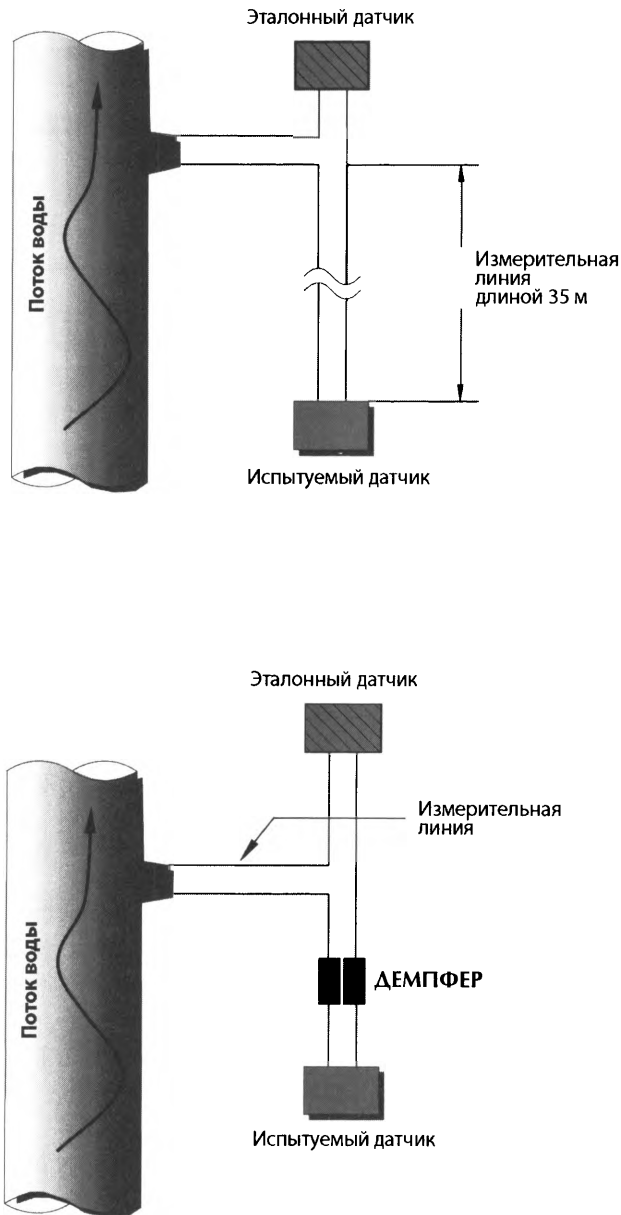


Рис. 10.1 Конфигурация лабораторных испытаний для определения влияния длины измерительных линий и закупок на время реакции систем измерения давления

Таблица 10.1. Экспериментальные результаты обнаружения закупорок измерительных линий при помощи метода анализа шумов

Конфигурация эксперимента	Время реакции (с)	
	Метод линейного сигнала	Метод анализа шумов
Эталонный датчик		
Только эталонный датчик	0,00	0,00
Эталонный датчик и 35 метров линии	0,01	0,00
Эталонный датчик и демпфер	0,34	0,27
Датчик Barton		
Только датчик Barton	0,12	0,17
Датчик Barton и 35 метров линии	0,27	0,28
Датчик Barton и демпфер	3,00	2,94

Испытания проводились с измерительной линией диаметром 6,35 мм

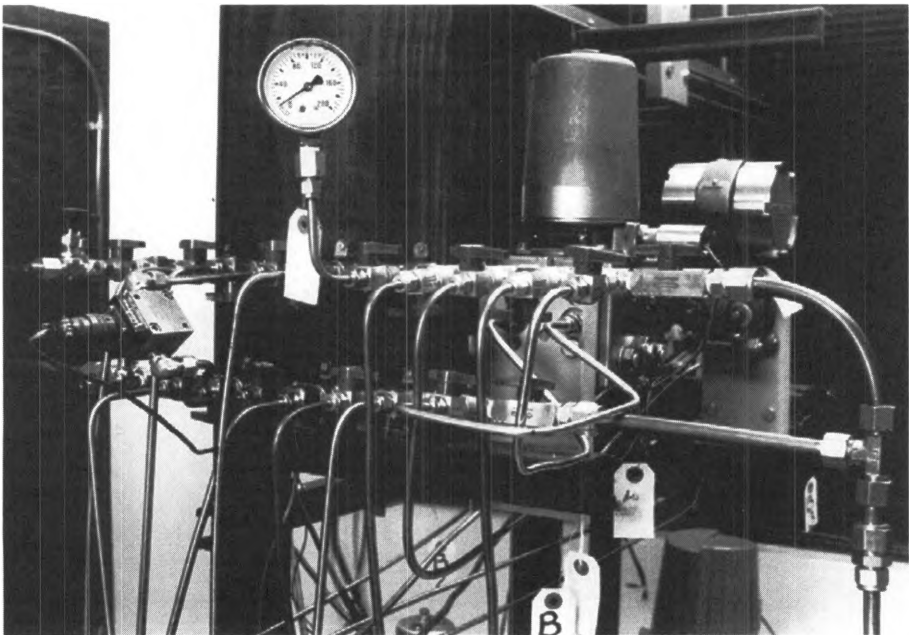


Рис. 10.2. Часть лабораторной испытательной петли, использовавшейся для разработки диагностики измерительных линий давления методом анализа шумов

1. Время реакции у двух эталонных быстродействующих датчиков измерялось, используя один из них в качестве испытуемого, а другой — в качестве контрольного. Как и следовало ожидать, как методом линейного сигнала, так и методом анализа шумов время

реакции эталонного датчика было определено практически равным нулю.

2. Расстояние до одного из двух эталонных датчиков было увеличено, используя измерительные линии длиной 35 м, и его время реакции было измерено повторно, используя второй датчик в качестве контрольного. Время реакции значительно не увеличилось, несмотря на 35 м измерительной линии, что объясняется низким значением податливости эталонного датчика и, следовательно, незначительным влиянием длины измерительной линии на его время реакции.
3. Длинные измерительные линии были сняты, но в измерительную линию, ведущую к одному из эталонных датчиков, был добавлен механический демпфер; измерения методами линейного сигнала и анализа шумов были повторены. Влияние демпфера привело к увеличению времени реакции на 0,3 с, причем это увеличение наблюдалось как в результатах метода линейного сигнала, так и метода анализа шумов. Из результатов, представленных в таблице 10.1, очевидно, что метод анализа шумов регистрирует влияние демпфера (который имитирует закупорку).
4. Эталонный датчик был заменен на датчик Barton, и три предыдущие испытания были повторены. Как показывают результаты в таблице 10.1, влияние длины измерительных линий и наличия закупорок для датчика Barton очень значительно из-за его большой податливости. Более конкретно, 35 метров измерительной линии добавили к времени реакции датчика Barton примерно 0,3 с, а наличие демпфера добавило примерно 3 с. Во всех трех случаях метод анализа шумов привел к получению результатов, сопоставимых с результатами метода линейного сигнала.

Основываясь на многочисленных лабораторных испытаниях, а также на наблюдениях автора за испытаниями на АЭС в течение двух десятков лет, можно сформулировать следующие выводы в отношении влияния измерительных линий на динамическую реакцию систем измерения давления:

- Длинные измерительные линии и закупорки (имитированные демпфером в приведенном выше примере) увеличивают время реакции системы измерения давления.
- Увеличение времени реакции из-за длины измерительной линии и закупорок зависит от податливости датчика: время реакции датчиков с большей податливостью (например, датчиков Barton)

- зависит от длины измерительных линий и наличия закупорок сильнее, чем время реакции датчиков с небольшой податливостью.
- Результаты измерения времени реакции, получаемые методом анализа шумов, отражают влияние длинных измерительных линий и любых значительных закупорок.
- Закупорки измерительных линий происходят из-за поломок вентилях, накопления загрязнений, затвердевания бора, замерзания жидкости в линии и т.п.
- При обнаружении закупорки измерительной линии методом анализа шумов, линию необходимо продуть (промыть), а испытание методом анализа шумов повторить, чтобы убедиться, что неисправность ликвидирована.

10.2. Воздух в измерительных линиях

Наличие воздуха или пустот в измерительных линиях давления обычно отражается на форме графика СПМ сигналов шума. На рис. 10.3 представлены расчетные графики, показывающие влияние наличия воздуха на динамические свойства слабо демпфированной системы измерения давления. На рисунке видно, что наличие воздуха заставляет резонанс смещаться в сторону более низких частот и что время реакции увеличивается по мере увеличения количества воздуха в линии.

На рис. 10.4 представлены графики СПМ для датчика давления Rosemount, испытывавшегося в лаборатории как в условиях присутствия в системе большого воздушного пузыря, так и отсутствия в ней воздуха. Этот эксперимент проводился при давлении 5 бар, используя измерительную линию из стальной трубы длиной 25 м и диаметром 6,35 мм. Как и ожидалось, наличие воздуха приводит к появлению резонанса на графике СПМ, а также ухудшает динамическую реакцию датчика.

На рис. 10.5 представлен еще один пример, демонстрирующий влияние наличия воздуха в системе измерения давления на ее динамическую реакцию. Когда в систему вводится воздух, все резонансы, присутствующие в спектре, сдвигаются в сторону более низких частот.

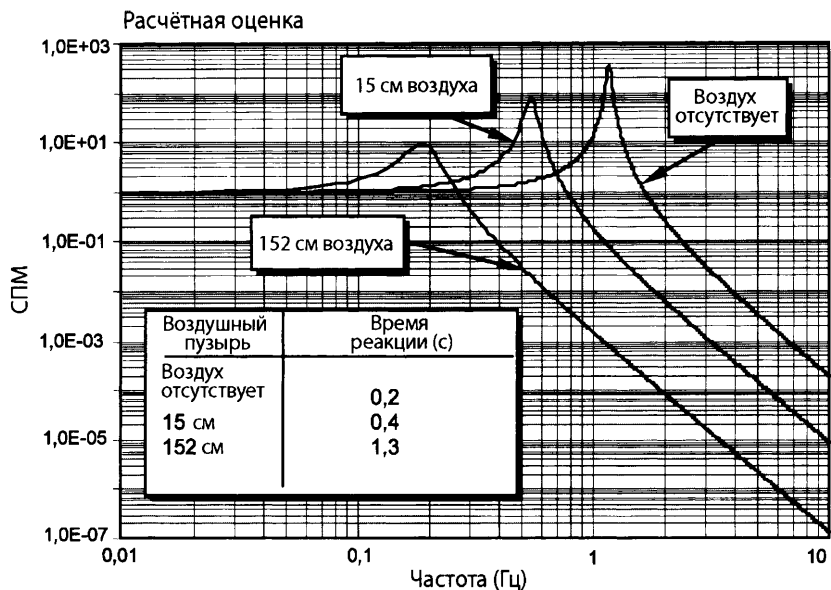


Рис. 10.3. Расчетные графики СПМ, показывающие влияние наличия воздуха в системе измерения давления на ее динамические свойства (внутренний диаметр измерительной линии 9,5 мм, давление в линии 0,3 бар)

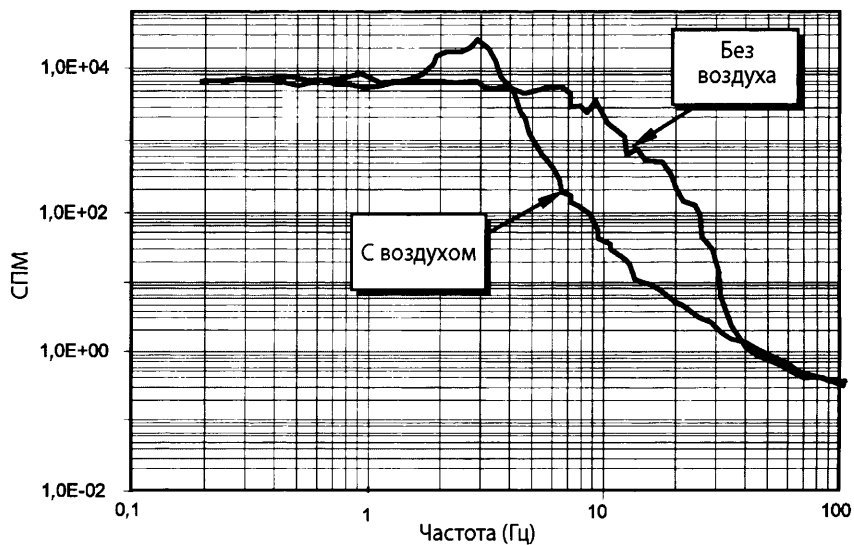


Рис. 10.4. Влияние наличия воздуха в системе на форму и частотный диапазон СПМ датчика давления

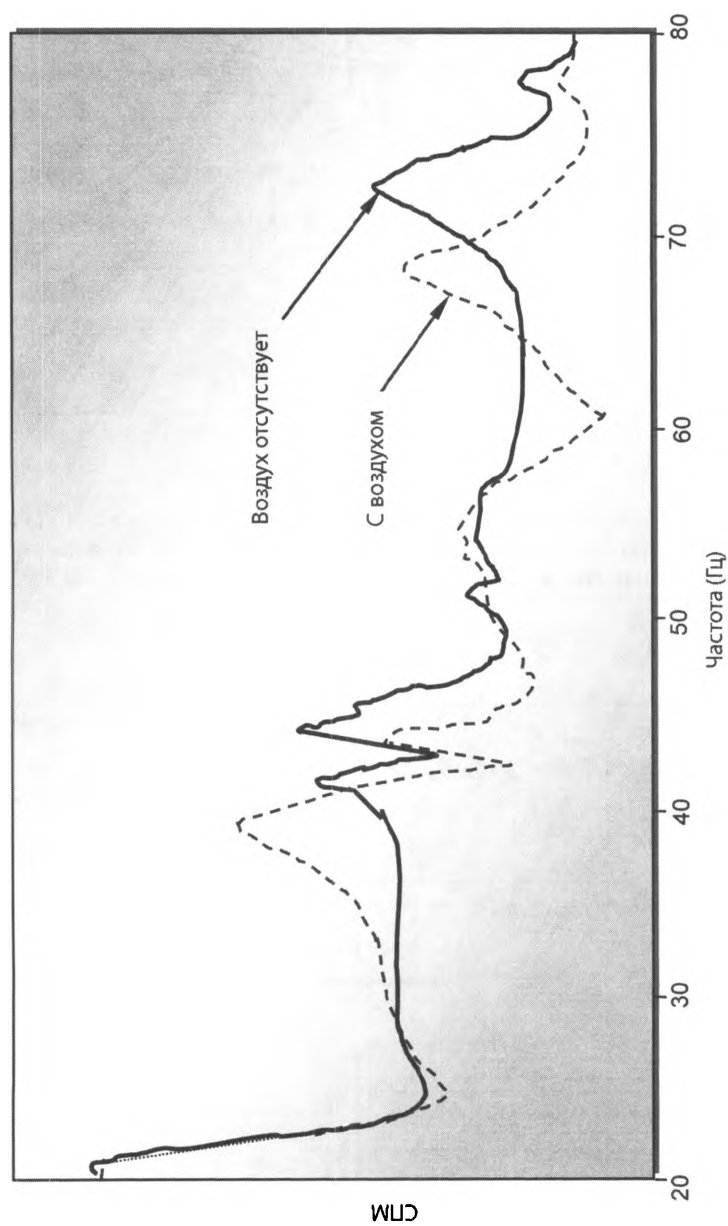


Рис. 10.5. Влияние наличия пустоты на СПМ сигнала шума датчика давления

10.3. Обнаружение утечек в измерительных линиях

Утечки в измерительных линиях давления встречаются довольно часто, это приводит к дрейфу сигнала на выходе датчиков, которые с этими линиями соединены. Иногда утечку удастся обнаружить при помощи мониторинга амплитуды сигнала шума технологического процесса на выходе датчика давления. На рис. 10.6 сравнивается сигнал шума на выходе исправного датчика с сигналом датчика, в измерительной линии которого есть утечка. Очевидно, что утечка снижает амплитуду сигнала шума, следовательно, если существуют реперные данные шума, утечку из измерительной линии можно обнаружить, используя метод анализа шумов. Если реперных данных нет, то к обнаружению линии с утечкой может привести сравнение выходного сигнала взаимодублируемых датчиков. Для проведения автоматической диагностики утечек следует на основании измерений вычислять величину среднеквадратичного отклонения данных шума и следить за ее изменениями.

10.4. Проблемы, вызываемые общими измерительными линиями

На некоторых станциях взаимодублирующие датчики используют одну общую измерительную линию. В этом случае любые закупорки, пустоты в линии или утечки в ней будут заведомо оказывать отрицательное влияние на работу всех датчиков, которые к этой линии присоединены.

Общие измерительные линии могут также вызывать дополнительные трудности, когда к одним и тем же линиям присоединены датчики с разными значениями податливости. В таких случаях время реакции каждого датчика в основном определяется временем реакции датчика с самой высокой податливостью. Подобное явление было зарегистрировано при определении времен реакции четырех датчиков Rosemount, применявшихся для измерения уровня в парогенераторах АЭС с реактором PWR (рис. 10.7 и 10.8). На рис. 10.7 показаны схемы подключения четырех датчиков Rosemount (идентификационные номера 518, 528, 538 и 548) к тем же измерительным линиям, что и широкодиапазонные датчики Barton (на рис. 10.7 обозначены в виде черных кругов). На рис. 10.8 представлены графики СПМ четырех датчиков Rosemount: СПМ слева получены при испытаниях этих датчиков методом анализа шумов и форма их СПМ соответствует форме СПМ датчиков Barton. Это объясняется тем, что податливость датчиков Barton выше,

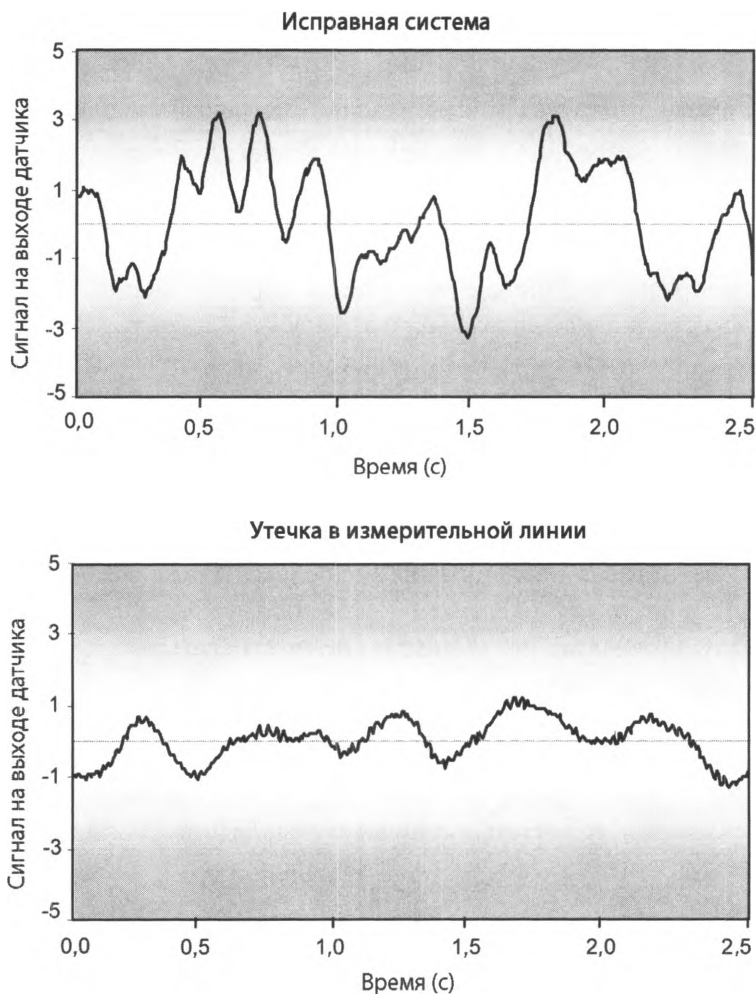


Рис. 10.6. Сигнал шума на выходе датчиков давления при наличии утечки в их измерительных линиях и без нее

чем датчиков Rosemount, поэтому они действуют, как демпферы, оказывая доминирующее влияние на сигнал шума на выходе датчиков Rosemount.

Испытания датчиков Rosemount были повторены двумя годами позже, и при этом было обнаружено, что форма их СПМ осталась прежней, за исключением датчика 528, СПМ которого стала напоминать по форме СПМ датчика Rosemount. Расследование этого явления выявило, что за время, прошедшее между двумя испытаниями, датчик Barton, имеющий общую измерительную линию с датчиком 528, был заменен на датчик Rosemount.

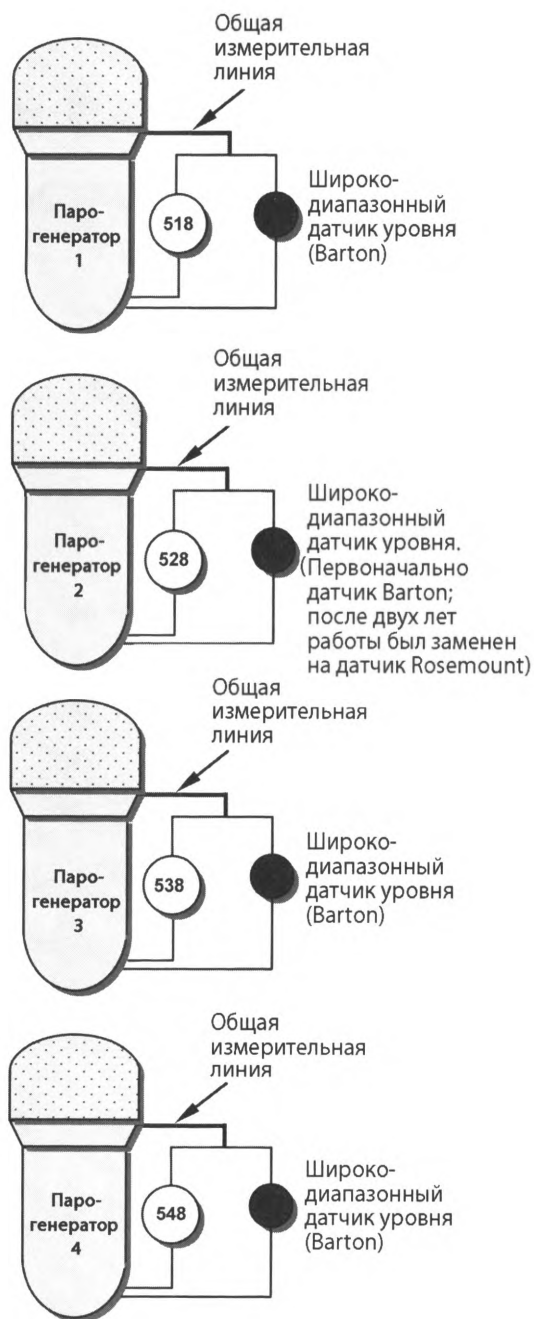


Рис. 10.7 Пример расположения общих измерительных линий на АЭС

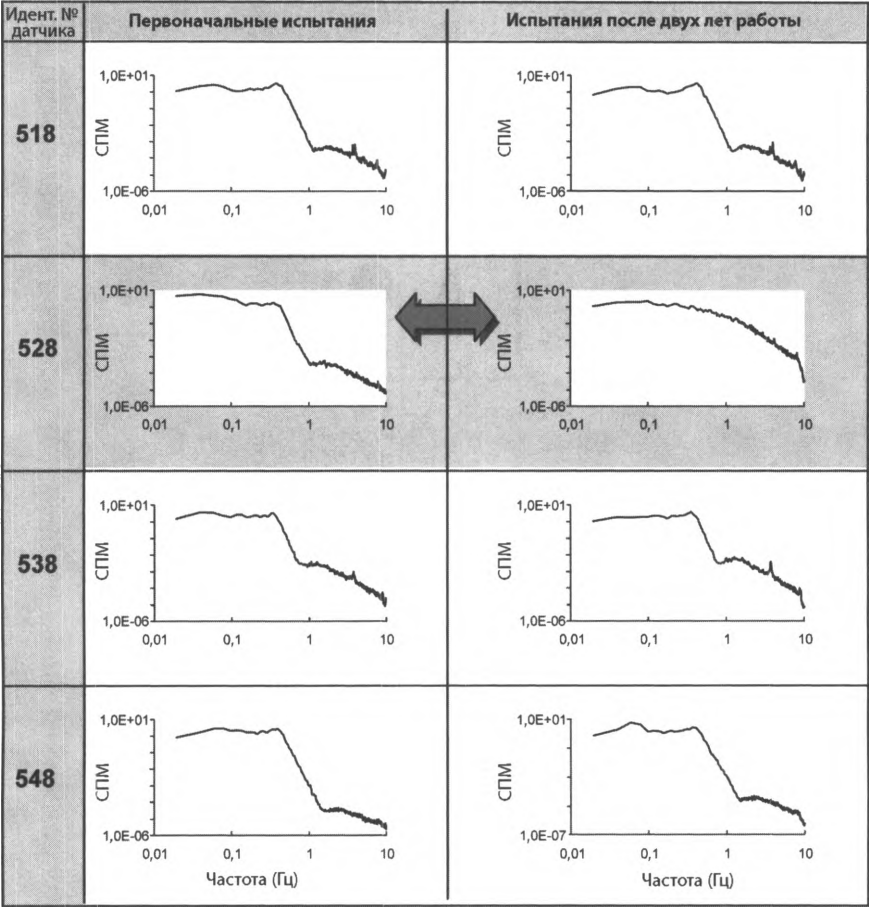


Рис. 10.8 Графики СПМ датчиков с общими измерительными линиями

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hashemian, H.M. (2005) Sensor Performance and Reliability. ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society, Research Triangle Park, North Carolina.
Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности. М.: Издательство Бином, 2008.
2. Analysis and Measurement Services Corporation (1979) Response Time Qualification of Resistance Thermometers in Nuclear Power Plant Safety System. Topical Report submitted to the NRC under Millstone 2 Docket No. 50-336, AMS, Knoxville, Tennessee.
3. Electric Power Research Institute (2000) On-line Monitoring of Instrument Channel Performance. EPRI Topical Report No TR-104965-RI, NRC SER, Palo Alto, California.
4. Electric Power Research Institute (1997) Rod Control System Maintenance Guide for Westinghouse Pressurized Water Reactors. Nuclear Maintenance Application Center (NMAC) Report No TR-108152, Palo Alto, California.
5. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1998) Advanced Instrumentation and Maintenance Technologies for Nuclear Power Plants. NUREG/CR-5501, Washington, DC.
6. Tew, WL, SW, Benz, SP, Dresselhaus, P, and Hashemian, HM (2005) New Technologies for Noise Thermometry with Applications in Harsh and/or Remote Operating Environments. 51st International Instrumentation Symposium of Instrumentation, Systems and Automation Society (ISA), Knoxville, Tennessee.
7. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1990) Aging of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors. NUREG/CR-5560, Washington, DC.

8. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1995) On-Line Testing of Calibration of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants. NUREG/CR-6343, Washington, DC.
9. Hashemian, H.M. (2003) Instrument Calibration. Instrument Engineers' Handbook, Fourth Edition, Chapter 1.8, Process Measurement and Analysis, Volume 1, CRC Press.
10. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1997) Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants. NUREG-0800, Washington, DC.
11. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1981) Safety Evaluation Report Review of Resistance Temperature Detector Time Response Characteristics. NUREG-0809, Washington, DC.
12. Electric Power Research Institute (1978) In-Situ Response Time Testing of Platinum Resistance Thermometers. EPRI Report No NP-834, Vol 1, Palo Alto, California.
13. Electric Power Research Institute (1980) Temperature Sensor Response and Characterization. EPRI Report No NP-1486, Palo Alto, California.
14. Electric Power Research Institute (1977) In Situ Response Time Testing of Platinum Resistance Thermometers. EPRI Report Number NP-459, Project 503-3, Palo Alto, California.
15. Hashemian, H.M. (2003) Response Time and Drift Testing. Instrument Engineers' Handbook, Fourth Edition, Chapter 1.9, Process Measurement and Analysis, Vol 1, CRC Press.
16. Hashemian, H.M. (2002) Safety Instrumentation and Justification of Its Cost. Instrument Engineers' Handbook, Third Edition, Chapter 2.11, Process Software and Digital Networks, CRC Press.
17. Hashemian, H.M. (2002) Optimized Maintenance and Management of Aging of Critical Equipment in Nuclear Power Plants, Power Plant Surveillance and Diagnostics. Chapter 3, Applied Research with Artificial Intelligence, Springer-Verlag, New York.
18. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1993) Long Term Performance and Aging Characteristics of Nuclear Plant Pressure Transmitters. NUREG/CR-5851, Washington, DC.
19. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1995) Assessment of Fiber Optic Pressure Sensors. NUREG/CR-6312, Washington, DC.
20. International Atomic Energy Agency (2000) Management of Ageing of I&C Equipment in Nuclear Power Plants. IAEA Publication TECDOC-1147, Vienna, Austria.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Библиография

В приложении приводится исчерпывающий перечень публикаций автора и его коллег по корпорации AMS и другим местам работы по тематике, которая прямо или косвенно связана с материалом данной книги. Большинство включенных публикаций можно получить, обратившись в одну из организаций, указанных ниже. Заметим, что приводимый перечень включает патенты, выданные или готовые к выдаче автору и его коллегам.

Национальная служба технической информации США (NTIS),
www.ntis.gov

Бюро печати Правительства США, www.gpo.gov

Международная электротехническая комиссия (IEC), www.iec.ch

Международное агентство по атомной энергии, www.iaea.org

Публичная библиотека Комиссии по ядерному регулированию США, www.nrc.gov

Корпорация AMS, www.arms-corp.com

Общество специалистов по измерительным устройствам и автоматическим системам США, www.isa.org

Американское общество по испытаниям и материалам,
www.astm.org

Бюро патентов и торговых марок США, www.uspto.gov

Адреса перечисленных выше организаций приведены ниже:

- National Technical Information Service, 5285 Port Royal Road, Springfield, VA 22161 USA
- U.S. Government Printing Office, 732 North Capitol St. NW, Washington, DC 20401 USA
- IEC Central Office, 3, rue de Varembe, P.O. Box 131, CH - 1211 GENEVA 20, Switzerland
- International Atomic Energy Agency, P.O. Box 100, Wagramer Strasse 5, A-1400 Vienna, Austria
- AMS, 9111 Cross Park Drive, Building A-100, Knoxville, TN 37923 USA
- ISA, 67 Alexander Drive, PO Box 12277, Research Triangle Park, NC 27709 USA
- ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA
- Office of Public Affairs, U.S. Patent and Trademark Office, P. O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450 USA

Публикации Правительства США

- G1. Hashemian, H.M., Holbert, K.E., Kerlin, T.W., Upadhyaya, B.R., "A Low Power Fourier Transform Processor." NASA Goddard Space Flight Center, Contract Number NAS5-28635 (July 1985).
- G2. Hashemian, H.M., "Determination of Installed Thermocouple Response." U.S. Air Force, Arnold Engineering Development Center, Report Number AEDC-TR-86-46 (December 1986).
- G3. Hashemian, H.M., Holbert, K.E., Thie, J.A., Upadhyaya, B.R., Kerlin, T.W., Petersen, K.M., Beck, J.R., "Sensor Surveillance Using Noise Analysis." U.S. Department of Energy, Contract Number DE-AC05-86ER80405 (March 1987).
- G4. Hashemian, H.M., et al., "Degradation of Nuclear Plant Temperature Sensors." U.S. Nuclear Regulatory Commission, Report Number NUREG/CR-4928 (June 1987).
- G5. Hashemian, H.M., et al., "Effect of Aging on Response Time of Nuclear Plant Pressure Sensors." U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5383 (June 1989).
- G6. Hashemian, H.M., et al., "Aging of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors." U.S. Nuclear Regulatory Commission, Report Number NUREG/CR-5560 (June 1990).
- G7. Hashemian, H.M., "New Technology for Remote Testing of Response Time of Installed Thermocouples." United States Air Force, Arnold Engineering Development Center, Report Number AEDC-TR-91-26, Volume 1 - Background and General Details (January 1992).
- G8. Hashemian, H.M., and Mitchell, D.W., "New Technology for Remote Testing of Response Time of Installed Thermocouples." United States Air Force, Arnold Engineering Development Center, Report Number AEDC-TR-91-26, Volume 2 - Determination of Installed Thermocouple Response Research Data (January 1992).
- G9. Hashemian, H.M., et al., "New Technology for Remote Testing of Response Time of Installed Thermocouples." United States Air Force, Arnold Engineering Development Center, Report Number AEDC-TR-91-26, Volume 3 - Thermocouple Response Time Test Instrumentation (January 1992).
- G10. Hashemian, H.M., et al., "Validation of Smart Sensor Technologies for Instrument Calibration Reduction in Nuclear Power Plants." U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5903 (January 1993).

- G11. Hashemian, H.M., "Long Term Performance and Aging Characteristics of Nuclear Plant Pressure Transmitters." U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5851 (March 1993).
- G12. Hashemian, H.M., et al., "Improved Temperature Measurement in Composite Material for Aerospace Applications." National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, Contract Number NAS8-39814, MSFC, AL (July 1993).
- G13. Hashemian, H.M., et al., "Assessment of Fiber Optic Pressure Sensors." U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6312 (April 1995).
- G14. Hashemian, H.M., et al., "New Sensor for Measurement of Low Air Flow Velocity." U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6334 (August 1995).
- G15. Hashemian, H.M., "On-Line Testing of Calibration of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants." U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6343 (November 1995).
- G16. Hashemian, H.M., Shell, C.S., and C.N. Jones, "New Instrumentation Technologies for Testing the Bonding of Sensors to Solid Materials." National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, NASA/CR-4744 (May 1996).
- G17. Hashemian, H.M., et al., "Advanced Instrumentation and Maintenance Technologies for Nuclear Power Plants." U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5501 (August 1998).

Статьи в научных журналах

- J1. Kerlin, T.W., Miller, L.F., and Hashemian, H.M., "In-Situ Response Time Testing of Platinum Resistance Thermometers." ISA Transactions, Volume 17, No. 4, page 71-88 (1978).
- J2. Kerlin, T.W., Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Time Response Testing of Temperature Sensors." ISA Transactions, Volume 20, No. 1 (1981).
- J3. Hashemian, H.M., Thie, J.A., and Upadhyaya, B.R., "Reactor Sensor Surveillance Using Noise Analysis." Nuclear Science and Engineering, Vol. 98, Number 2, pp. 96-102 (February 1988).
- J4. Hashemian, H.M., et al., "In Situ Response Time Testing of Thermocouples." ISA Transactions, Volume 29, Number 4, pp. 97-104 (1990).

- J5. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Measurement of Performance of Installed Thermocouples." ISA Test Measurement Division Newsletter, Volume 29, Number 2 (April 1992).
- J6. Hashemian, H.M., "Effects of Normal Aging on Calibration and Response Time of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors and Pressure Sensors." Nuclear Safety Technical Progress Journal, Volume 35, Number 2, pp. 223-234 (1994).

Статьи в прочих журналах

- M1. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Boosting Accuracy of Industrial Temperature Measurement." Power Magazine, Vol. 133, No. 3, pp. 74-76 (May 1989).
- M2. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Assuring Accurate Temperature Measurement." Intech Magazine, Vol. 36, No. 10, pp. 45-48 (October 1989).
- M3. Hashemian, H.M., et al., "Measuring Critical Process Temperatures." Control Magazine, Vol. III, No. 4, pp. 62-69 (April 1990).
- M4. Riner, J.L., "In-Situ Testing of Industrial Sensors." Control Magazine, Vol. 38, Number 15, pp. 175-176 (November 1991).
- M5. Petersen, K.M., "Testing Sensors For Accuracy and Speed." Chemical Engineering Magazine, pp. 131-134 (February 1992).
- M6. Hashemian, H.M., Petersen, K.M., "In-Situ Tests Gauge Thermocouple Performance, Part 1." Intech, Vol. 40, No. 1, pp. 30-32 (January 1993).
- M7. Hashemian, H.M., Petersen, K.M., "In-Situ Tests Gauge Thermocouple Performance, Part 2." Intech, Vol. 40, No. 6, pp. 31-33 (June 1993).
- M8. Hashemian, H.M., "Performance Testing of Nuclear Plant Temperature and Pressure Sensors." Nuclear Plant Journal, Vol. 12, No. 7, pp. 46 (November-December 1994).
- M9. Hashemian, H.M., Riner, J.L., K.M. Petersen, D.D. Beverly, "Online Testing Assures Integrity of Sensors." Chemical Engineering, Vol. 102, No. 3, pp. 84-88 (March 1995).
- M10. Hashemian, H.M., "Catching the Drift." Pressure, a supplement to Intech Magazine, an ISA publication (August 2003).
- M11. ISA Editor (for H.M. Hashemian's book), "Impulse Lines are Vital Intelligence Link." Intech Magazine, an ISA publication (November 2005).

Технические доклады

- T1. Hashemian, H.M., Jacquot, J.P., and Guerin, B., "Preliminary Report: Response Time Testing of Resistance Temperature Detectors (RTDs) in EDF Test Loop." Electricite de France, EDF Report Number HP/236/79/04 (January 1978).
- T2. Kerlin, T.W., Miller, L.F., Hashemian, H.M., and Poore, W.P., "In-Situ Response Time Testing of Platinum Resistance Thermometers." Electric Power Research Institute, EPRI Report Number NP-834, Vol. 1 (July 1978).
- T3. Kerlin, T.W., Miller, L.F., Hashemian, H.M., Poore, W.P., Shorska, M., Upadhyaya, B.R., Cormault, P., Jacquot, J.P., "Temperature Sensor Response Characterization." Electric Power Research Institute, EPRI Report Number NP-1486 (August 1980).
- T4. Beverly, D., Fain, R., Mitchell, D., Shell, C., Hashemian, H.M., Dressler, R., "Rod Control System Maintenance Guide for Westinghouse Pressurized Water Reactors." Electric Power Research Institute, EPRI Report Number TR-108152 (April 1997).

Публикации МАГАТЭ (в подготовке которых автор непосредственно участвовал)

- IA1. "Management of Ageing of I&C Equipment in Nuclear Power Plants." IAEA Publication TECDOC-1147, Vienna, Austria (June 2000).
- IA2. "Harmonization of the Licensing Process for Digital Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants." IAEA Publication TECDOC-1327, Vienna, Austria (December 2002).
- IA3. "Management of Life Cycle and Aging at Nuclear Power Plants: Improved I&C Maintenance," IAEA Publication TECDOC-1402, Vienna, Austria (August 2004).
- IA4. "On-Line Monitoring for Nuclear Power Plants, Part 2: Instrumentation Channel Performance Monitoring," New IAEA document due for publication in 2006.
- IA5. "On-Line Monitoring for Nuclear Power Plants Part 2: Process and Component Condition Monitoring and Diagnostics," New IAEA documented due for publication in 2007.

Книги или главы в книгах

- B1. Hashemian, H.M., "Safety Instrumentation and Justification of Its Cost." Instrument Engineers' Handbook, Third Edition, Chapter 2.11, Process Software and Digital Networks, CRC Press, 2002.
- B2. Hashemian, H.M., "Instrument Calibration." Instrument Engineers' Handbook, Fourth Edition, Chapter 1.8, Process Measurement and Analysis, Volume 1, CRC Press, 2003.
- B3. Hashemian, H.M., "Response Time and Drift Testing." Instrument Engineers' Handbook, Fourth Edition, Chapter 1.9, Process Measurement and Analysis, Volume 1, CRC Press, 2003.
- B4. Liptak, Bela and Hashemian, H.M., "Cross-Correlation Flow Metering." Instrument Engineers' Handbook, Fourth Edition, Chapter 2.5, Process Measurement and Analysis, Volume 1, CRC Press, 2003.
- B5. Hashemian, H.M., "Optimized Maintenance and Management of Aging of Critical Equipment in Nuclear Power Plants," Power Plant Surveillance and Diagnostics, Chapter 3, Applied Research with Artificial Intelligence, Springer-Verlag, 2002.
- B6. Hashemian, H.M., "Sensor Performance and Reliability." Book published by ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society, © 2005.

Международные публикации

- I1. Kerlin, T.W., Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Response Characteristics of Temperature Sensors Installed in Processes." Vol. V/I, International Measurement Confederation (IMEKO), 9th World Congress, Berlin, Germany (May 1982).
- I2. Hashemian, H.M., Thie, J. A., and Upadhyaya, B. R., Holbert, K.E., "Sensor Response Time Monitoring Using Noise Analysis." Proceedings of the Fifth Specialists Meeting on Reactor Noise, Progress in Nuclear Energy, Pergamon Press, Vol. 21, pp. 583–592, Munich, FRG (October 1987).
- I3. Hashemian, H.M., Petersen, K.M., et al., "Aging Effects on Calibration and Response Time of Temperature Sensors in PWRs." Proceedings of 1989 Conference on Operability of Nuclear Systems in Normal and Adverse Environments (OPERA '89), Vol. 1, pp. 275–282, Lyon, France (September 1989).
- I4. Hashemian, H.M., Petersen, K.M., and Miller, L.F., "Dynamic Testing of Pressure Sensing Systems in Nuclear Power Plants."

- Proceedings of 1989 Conference on Operability of Nuclear Systems in Normal and Adverse Environments (OPERA '89), Vol. 2, pp. 935–942, Lyon, France (September 1989).
- I5. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "On-Line Testing of Performance of Nuclear Plant Pressure Transmitters Using Noise Analysis." IMORN-22 Conference, Delft University of Technology, Interfaculty Reactor Institute, The Netherlands (June 1990).
 - I6. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Achievable Accuracy and Stability of Industrial RTDs." Published by the American Institute of Physics, Seventh International Symposium on Temperature, Volume Six, pp. 427-432, Toronto, Canada (May 1992).
 - I7. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Loop Current Step Response Method For In-Place Measurement of Response Time of Installed RTDs and Thermocouples." Published by American Institute of Physics, Seventh International Symposium on Temperature, Volume Six, pp. 1151–1156, Toronto, Canada (May 1992).
 - I8. Hashemian, H.M., "Measurement of Static and Dynamic Performance of Temperature and Pressure Instrumentation in Nuclear Power Plants." Presented at the 1992 COMADEM International Congress, CETIM, Paris, France (July 1992).
 - I9. Hashemian, H.M., et al., "Aging of Nuclear Plant RTDs and Pressure Transmitters." Proceedings of PLEX '93 International Conference and Exhibition, pp. 85–99, Zurich, Switzerland (November 29-December 1, 1993).
 - I10. Hashemian, H.M., Riner, J.L., "On-Line Monitoring of Calibration Drift of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants." Proceedings of PLEX '93 International Conference and Exhibition, pp. 488–491, Zurich, Switzerland (November 29 -December 1, 1993).
 - I11. Hashemian, H.M., Riner, J.L., "In-Situ Response Time Testing of RTDs and Pressure Transmitters in Pressurized Water Reactors." Proceedings of PLEX '93 International Conference and Exhibition, pp. 476–479, Zurich, Switzerland (November 29 — December 1, 1993).
 - I12. Hashemian, H.M., "Aging of Nuclear Plant Instrumentation." Proceedings of 1st International Symposium on Nuclear Energy (AREN), pp. 129-152, Bucharest, Romania (December 1993).
 - I13. Hashemian, H.M., "Precision Calibration of RTDs for Nuclear Power Plants." Proceedings of 1st International Symposium on Nuclear Energy (AREN), pp. 153–169, Bucharest, Romania (December 1993).

- I14. Hashemian, H.M., "Response Time Testing of Temperature and Pressure Sensors in Nuclear Power Plants." Proceedings of 1st International Symposium on Nuclear Energy (AREN), pp. 170–194, Bucharest, Romania (December 1993).
- I15. Hashemian, H.M., "Aging Characteristics of Nuclear Plant RTDs and Pressure Transmitters." Proceedings of the 4th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, Paper #32-C, Vol 2, pp 32-C-1 — 32-C-6, Taipei, Taiwan (April 1994).
- I16. Hashemian, H.M., and Mitchell, D.W., "On-Line Testing of Calibration of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants." Proceedings of the Fourth International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, Paper #33-B, Vol 2, pp. 33-B-1 - 33-B-6, Taipei, Taiwan (April 1994).
- I17. Hashemian, H.M., "On-Line Measurement of Response Time of Temperature and Pressure Sensors in PWRs." Proceedings of the Fourth International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, Paper #33-C, Vol 2, pp. 33-C-1 — 33-C-6, Taipei, Taiwan (April 1994).
- I18. Hashemian, H.M., Jakubenko, I., Forejt, V., "Response Time Testing and Calibration of Temperature and Pressure Sensors in Nuclear Power Plants." Proceedings of the Specialist's Meeting on Instrumentation and Control of WWER Type Nuclear Power Plants, Prague/Rez, Czech Republic (September 1994).
- I19. Hashemian, H.M., Jakubenko, I., Forejt, V., "Measurement of Core Barrel Vibration and Testing for Core Flow Anomalies in Pressurized Water Reactors." Proceedings of the Specialist's Meeting on Instrumentation and Control of WWER Type Nuclear Power Plants, Prague/Rez, Czech Republic (September 1994).
- I20. Hashemian, H.M., Jakubenko, I., Forejt, V., "Measurement of Drop Time of Control and Shutdown Rods and Testing of CRDMs in Nuclear Power Plants." Proceedings of the Specialist's Meeting on Instrumentation and Control of WWER Type Nuclear Power Plants, pp. 61–76, Prague/Rez, Czech Republic (September 1994).
- I21. Hashemian, H.M., "In-Situ Response Time Testing of Temperature and Pressure Sensors in Nuclear Power Plants." Presented at the ENC '94 ENS-ANS-FORATOM World Exhibition, Lyon, France (October 1994).
- I22. Hashemian, H.M., "New Methods for On-Line Testing of Calibration of Temperature and Pressure Sensors in Nuclear Power

- Plants." Presented at the ENC '94 ENS-ANSFORATOM World Exhibition, Lyon, France (October 1994).
- I23. Hashemian, H.M., "On-Line Response Time and Calibration Testing of Instrumentation in Nuclear Power Plants." Presented at the INEC 2nd International Conference on Control & Instrumentation in Nuclear Installations, London, England (April 1995).
- I24. Hashemian, H.M., "On-Line Testing of Response Time and Calibration of Temperature and Pressure Sensors in Nuclear Power Plants." Proceedings of the Third International Conference on Nuclear Engineering — ICONE-3, pp. 1501–1506, Kyoto, Japan (April 1995).
- I25. Hashemian, H.M., "Experience with a PC-Based System for Noise and DC Signal Analysis in PWRs." Presented at SMORN VII, Avignon-Palais des Papes, France (June 1995).
- I26. Hashemian, H.M., "Results of Aging Research on Nuclear Plant Instrumentation." Presented at the IAEA Specialists Meeting, San Carlos de Bariloche, Argentina (October 1995).
- I27. Hashemian, H.M., "Automated Testing of Critical Nuclear Plant Equipment." Presented at the IAEA Specialists Meeting, San Carlos de Bariloche, Argentina (October 1995).
- I28. Hashemian, H.M., "PC-Based Equipment and Techniques for Testing the Performance of Critical Equipment in Nuclear Power Plants." Presented at the PLEM + PLEX 95 Nuclear Plant Life Management and Extension Conference, Nice, France (November 1995).
- I29. Hashemian, H.M., "New Methods for Monitoring the Performance of Critical Equipment in Nuclear Power Plants." Invited paper for the IAEA Specialists Meeting, Session 2, San Carlo de Bariloche, Argentina (October 17–19, 1995).
- I30. Mediavilla, F., Hashemian, H.M., "Medida Automatica Del Tiempo De Caida De Barras De Control Y De Parada y Pruebas De Actuacion Del Mecanismo De Accionamiento De Barras." Proceedings of 23rd Annual Meeting of the Spanish Nuclear Society, pp. 286–288, La Coruna, Spain (November 5–7, 1997).
- I31. Hashemian, H.M., "History of On-Line Calibration Monitoring Developments in Nuclear Power Plants." Presented at the Technical Meeting on Increasing Instrument Calibration Interval Through On-Line Calibration Technology, International Atomic Energy Agency (IAEA), Halden, Norway (September 27–29, 2004).
- I32. Hashemian, H.M., "Implementation of On-Line Monitoring to Increase the Calibration Interval of Pressure Transmitters." Pre-

- sented at the Technical Meeting on Increasing Instrument Calibration Interval Through On-Line Calibration Technology, International Atomic Energy Agency (IAEA), Halden, Norway (September 27–29, 2004).
- I33. Hashemian, H.M., "Equipment Life Cycle Management Through On-Line Condition Monitoring." Presented at the Technical Meeting on On-Line Condition Monitoring of Equipment and Processes in Nuclear Power Plants Using Advanced Diagnostic Systems, International Atomic Energy Agency (IAEA), Knoxville, TN (June 27–30, 2005).
- I34. Hashemian, H.M., "Aging Management Through On-Line Condition Monitoring." Presented at the PLIM + PLEX 2006 Conference, Paris, France (April 10–11, 2006).

Публикации в США

- N1. Kerlin, T.W., Mott, J.E., Warner, DC, Hashemian, H.M., Arendt, J.S., Gentry, T.S., and ain, D.G., "Progress in Development of a Practical Method for In-Situ Response Time Testing of Platinum Resistance Thermometers." Transactions of American Nuclear Society, Vol. 23, 428 (June 1976).
- N2. Kerlin, T.W., Miller, L.F., and Hashemian, H.M., "In-Situ Response Time Testing of Temperature Sensors." Transactions of American Nuclear Society, Volume 27, page 79–680 (1977).
- N3. Hashemian, H.M., and Kerlin, T.W., "Response Time Testing of Platinum-Resistance Thermometers at St. Lucie Nuclear Station." Transactions of American Nuclear Society, page 532 (June 1978).
- N4. Hashemian, H.M., and Kerlin, T.W., "Validation of Techniques for Response Time Testing of Temperature Sensors in PWRs." Transactions of American Nuclear Society, page 736 (June 1980).
- N5. Kerlin, T.W., Hashemian, H.M., Petersen, K.M., Thomas, J., Snodgrass, D., Haynes, H., and Elder, R.T., "Response Time Testing of Resistance Thermometers in Operating Pressurized Water Reactors." Transactions of American Nuclear Society, pp. 324–325 (1980).
- N6. Kerlin, T.W., Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Time Response of Temperature Sensors." Paper C.I. 80-674, Proceedings of the ISA '80 International Conference and Exhibit, Houston, TX (October 1980).
- N7. Hashemian, H.M., et al., "Resistance Thermometer Response Time Characterization." SECON'82, "Instrumenting for a Better

- World." 28th Southeastern Conference and Exhibit, Sponsored by the Instrument Society of America, Richmond, VA (May 1982).
- N8. Kerlin, T.W., and Hashemian, H.M., "New Methods for Response Time Qualification of Temperature Sensors." Conference Proceedings Volume 2, Sensors and Systems 82 Conference, Chemical Sensors/Various Sensors Application, Chicago, IL (June 1982).
- N9. Kerlin, T.W., Shepard, R.L., Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Response of Installed Temperature Sensors." Temperature its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 5, pp. 1357-1366, American Institute of Physics, Washington, DC (1982).
- N10. Hashemian, H.M., and Kerlin, T.W., "Experience with RTD Response Time Testing in Nuclear Power Plants." Proceedings of the Industrial Temperature Measurement Symposium, pp. 14.01-14.23, Knoxville, TN (September 1984).
- N11. Hashemian, H.M., Kerlin, T.W., and Petersen, K.M., "In-Situ Response Time Testing of Temperature and Pressure Sensors." Presented at IEEE Winter Power Meeting, New York, NY (February 1986).
- N12. Hashemian, H.M., Thie, J.A., and Upadhyaya, B.R., "Reactor Sensor Surveillance Using Noise Analysis." Proceedings of the Topical Meeting on Reactor Physics and Safety, NUREG/CP-0080, Vol. 2, Saratoga Springs, NY (September 1986).
- N13. Hashemian, H.M., et al., "New Methods for Response Time Testing of Industrial Temperature and Pressure Sensors." Proceedings of Annual Meeting of American Society of Mechanical Engineers (ASME), pp. 79-85, Anaheim, CA (December 1986).
- N14. Hashemian, H.M., "Response Time of Nuclear Power Plant RTDs." Transactions of the American Nuclear Society, 1987 Annual Meeting, Dallas, TX (June 1987).
- N15. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Performance of Nuclear Plant RTDs." Proceedings of the 13th Biennial Conference on Reactor Operating Experience, International Meeting on Nuclear Power Plant Operation, ANS Transactions, Suppl. #1, Vol. 54, pp. 138-139, Chicago, IL (August-September 1987).
- N16. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Aging Degradation of Primary System RTDs." American Nuclear Society Transactions 1987 Winter Meeting, Vol. 55, pp. 518-520, Los Angeles, CA (November 1987).
- N17. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "New Methods for In-Situ Response Time Testing of Pressure Sensors in Nuclear Power Plants." Proceedings of the International Nuclear Power Plant Ag-

- ing Symposium, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CP-0100, Bethesda, MD (August 1988).
- N18. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Effect of Aging on Performance of Nuclear Plant RTDs." Proceedings of the International Nuclear Power Plant Aging Symposium, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CP-0100, Bethesda, MD (August 1988).
- N19. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Calibration and Response Time Testing of Industrial RTDs." Proceedings of the 34th International Instrumentation Symposium, Test Measurement Division of the Instrument Society of America, Albuquerque, NM (May 1988).
- N20. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "New Methods for Response Time Testing of Pressure Transmitters." Proceedings of the 34th International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, Albuquerque, NM (May 1988).
- N21. Thie, J.A., and Hashemian, H.M., "BWR Stability Measurements Using Neutron Noise Analysis." Presented at the 1988 Informal Meeting on Reactor Diagnostics, Sponsored by Duke Power Company, Orlando, FL (June 1988).
- N22. Hashemian, H.M., Thie, J.A., and Petersen, K.M., "Validation of Noise Analysis for Response Time Testing of Pressure Sensors in Nuclear Power Plants." Presented at the 1988 Informal Meeting on Reactor Diagnostics, Sponsored by Duke Power Company, Orlando, FL (June 1988).
- N23. Kerlin, T.W., and Hashemian, H.M., "Uncertainty in Temperature Measurements with Industrial Platinum Resistance Thermometers." Proceedings of the 11th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO), Vol. Sensors, pp. 593–601, Houston, TX (October 1988).
- N24. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Accuracy of Industrial Temperature Measurement." Proceedings of the ISA '88 International Conference and Exhibit, Houston, TX (October 1988).
- N25. Hashemian, H.M., et al., "Application of Noise Analysis for Response Time Testing of Pressure Sensors in Nuclear Power Plants." Proceedings of 7th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, Vol. 2, pp. 53.01–53.23, Knoxville, TN (May 1989).
- N26. Miller, L.F., and Hashemian, H.M., et al., "In-Situ Response Time Testing of Force-Balance Pressure Transmitters in Nuclear Power Plants." Proceedings of 7th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, Vol. 2, pp. 49.01–49.18, Knoxville, TN (May 1989).

- N27. Hashemian, H.M., et al., "In-Situ Response Time Testing of Thermocouples." Proceedings of the 35th International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, Orlando, FL (May 1989).
- N28. Hashemian, H.M., et al., "Accurate and Timely Temperature Measurements Using RTDs." Proceedings of the 36th International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, pp. 465-470, Denver, CO (May 1990).
- N29. Hashemian, H.M., "Effects of Aging on Calibration and Response Time of Nuclear Plant RTDs and Pressure Transmitters." Proceedings of the 18th Water Reactor Safety Information Meeting, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CP-0114, Volume 3, pp. 547-570, Rockville, MD (October 1990).
- N30. Hashemian, H.M., "Advanced Methods for Management of Aging of Nuclear Plant Instrumentation." Proceedings of the American Nuclear Society, Nuclear Power Plant and Facility Maintenance International Meeting, Volume 2, pp. 473-489, Salt Lake City, UT (April 1991).
- N31. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Measurement of Performance of Installed Thermocouples." Proceedings of the Aerospace Industries and Test Measurement Divisions of The Instrument Society of America, 37th International Instrumentation Symposium, pp. 913-926, ISA Paper #91-113, San Diego, CA (May 1991).
- N32. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Experience With On-Line Measurement of Response Time of Pressure Transmitters Using Noise Analysis." Proceedings of the Sixth Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, SMORN VI, pp. 68.01-68.12, Volume 2, Gatlinburg, TN (May 1991).
- N33. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Response Time Testing of Pressure Transmitters in Nuclear Power Plants." Proceedings of the Instrument Society of America, First Annual Joint ISA/EPRI Power Instrumentation Symposium, Volume 34, pp. 275-289, ISA Paper #91-720, St. Petersburg, FL (June 1991).
- N34. Hashemian, H.M., and Petersen, K.M., "Response Time Testing and Calibration of RTDs in Conjunction with By-Pass Manifold Elimination Projects." Proceedings of the Instrument Society of America, First Annual Joint ISA/EPRI Power Instrumentation Symposium, Volume 34, pp. 233-265, ISA Paper #91-717, St. Petersburg, FL (June 1991).

- N35. Hashemian, H.M., "On-Line Measurement of Response Time and Calibration of Temperature and Pressure Sensors in Nuclear Power Plants." Proceedings of the 15th Biennial Reactor Operations Division Topical Meeting on Reactor Operating Experience, American Nuclear Society, pp. 127–134, Bellevue, WA (August 1991).
- N36. Hashemian, H. M., "Effects of Aging on Calibration and Response Time of Nuclear Plant Pressure Transmitters." Proceedings of the 19th Water Reactor Safety Information Meeting, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CP-0119, Bethesda, MD (October 1991).
- N37. Hashemian, H.M., "Aging Evaluation of Nuclear Plant RTDs and Pressure Transmitters." Aging Research Information Conference, U.S. Nuclear Regulatory Agency, NUREG/CP-0121, Rockville, MD (March 1992).
- N38. Hashemian, H.M., et al., "Detection of Core Flow Anomalies in Pressurized Water Reactors." Published by Instrument Society of America, ISA/EPRI Power Instrumentation Symposium, Kansas City, MO, Volume 35, pp. 253-272, ISA Paper #92-0621 (June 1992).
- N39. Hashemian, H.M., and Mitchell, D.W., "On-Line Detection of Clogging of Pressure Sensing Lines in Nuclear Power Plants." Presented at the EPRI 5th Incipient Failure Detection Conference, Knoxville, TN (September 21–23, 1992).
- N40. Hashemian, H.M., "On-Line Testing of Calibration of Pressure Transmitters in Nuclear Power Plants." Published by IEEE, 1992 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Volume 2, pp. 773–774, Orlando, FL (October 1992).
- N41. Hashemian, H.M. and Petersen, K.M., "Loss of Fill Fluid in Nuclear Plant Pressure Transmitters." Presented at the 20th Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, MD (October 1992).
- N42. Hashemian, H.M. and Mitchell, D.W., "Evaluation of Smart Sensor Technologies for Instrument Calibration Reduction in Nuclear Power Plants." Presented at 20th Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, MD (October 1992).
- N43. Hashemian, H.M., "Effect of Sensing Line Blockages on Response Time of Nuclear Plant Pressure Transmitters." Presented at the 20th Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, MD (October 1992).
- N44. Hashemian, H.M., et al., "On-Line Testing of Calibration of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants." Proceedings of

- the 2nd ASME/JSME International Conference on Nuclear Engineering ICONE-2, pp. 767–774, San Francisco, CA (March 1993).
- N45. Mitchell, D.W., Hashemian, H.M., and Shell, C.S., "On-Line Detection of Blockages in Pressure Sensing Systems." Proceedings of the 2nd ASME/JSME International Conference on Nuclear Engineering ICONE-2, pp. 775–781, San Francisco, CA (March 1993).
- N46. Hashemian, H.M., and Stansberry, D.V., "Validation of Instrument Calibration Reduction Techniques for Nuclear Power Plants." Proceedings of the American Nuclear Society Topical Meeting, pp. 315–322, Oak Ridge, TN (April 1993).
- N47. Hashemian, H.M., Mitchell, D.W., and Antonescu, C.E., "Validation of On-Line Monitoring Techniques for In-Situ Testing of Calibration Drift of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants." Proceedings of the International Atomic Energy Agency (IAEA) Specialist Meeting, NUREG/CP-0134, pp. 209–233, Rockville, MD (May 1993).
- N48. Hashemian, H.M., and Riner, J.L., "Effects of Normal Aging on Calibration and Response Time of Nuclear Plants RTDs and Pressure Sensors." Proceedings of the International Atomic Energy Agency (IAEA) Specialist Meeting, NUREG/CP-0134, pp. 157–178, Rockville, MD (May 1993).
- N49. Hashemian, H.M., and Riner, J.L., "In-Situ Measurement of Response Time of RTDs and Pressure Transmitters in Nuclear Power Plants." Proceedings of the International Atomic Energy Agency (IAEA) Specialist Meeting, NUREG/CP-0134, pp. 89–113, Rockville, MD (May 1993).
- N50. Hashemian, H.M., et al., "RTD Cross Calibration in Pressurized Water Reactors." Proceedings of the 3rd International Joint ISAPOWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Vol. 36, pp. 81–102, Phoenix, AZ (June 1993).
- N51. Hashemian, H.M., and Beverly, D.D., "Precision Calibration of Industrial RTDs for Critical Temperature Measurements." Proceedings of the 3rd International Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Vol. 36, pp. 391–412, Phoenix, AZ (June 1993).
- N52. Hashemian, H.M., and Riner, J.L., "On-Line Testing of Calibration of Pressure Transmitters in Nuclear Power Plants." Proceedings of the 3rd International Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Vol. 36, pp. 439–450, Phoenix, AZ (June 1993).

- N53. Hashemian, H.M., Mitchell, D.W., "On-Line Calibration Monitoring for Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants." Proceedings of the 21st Water Reactor Safety Meeting, NUREG/CP-0133, pp. 191–206, Bethesda, MD (October 1993).
- N54. Riner, J.L., "On-Line Response Time Testing Methods for Process Instrumentation and the Effects of Normal Aging on Their Dynamic Characteristics." Presented at the AIChE 1994 Spring National Meeting, Atlanta, GA (April 1994).
- N55. Riner, J.L., et al., "Validation of On-Line Monitoring Techniques for the Detection of Drift in Process Sensors." Presented at the AIChE 1994 Spring National Meeting, Atlanta, GA (April 1994).
- N56. Hashemian, H.M., "Instrument Calibration Reduction System for Nuclear Power Plants." Proceedings of the American Power Conference, Vol. 56-II, pp. 1246–1250, Chicago, IL (April 1994).
- N57. Hashemian, H.M., "New Methods for Remote Testing of Accuracy and Response Time of Installed Temperature and Pressure Sensors." Proceedings of the American Power Conference, Vol. 56-I, pp. 409–414, Chicago, IL (April 1994).
- N58. Mitchell, D.W., and Hashemian, H.M., "New Technology for Testing the Installation Integrity of Thermocouples in Composite Materials for SRM Nozzles." Proceedings of the Instrument Society of America 40th International Instrumentation Symposium, ISA Paper #94-6257, pp. 233–242, Baltimore, MD (May 1994).
- N59. Mitchell, D.W., and Hashemian, H.M., "Effect of Sensing Line Length and Blockages on Dynamic Performance of Pressure Sensing Systems." Proceedings of the 1994 POWID/EPRI Symposium, ISA Paper #94-440, pp. 201–210, Orlando, FL (June 1994).
- N60. Fain, R.E., Petersen, K.M., Hashemian, H.M., "New Equipment for Rod Drop and Control Rod Drive Mechanism Timing Tests in PWRs." Presented at the 1994 POWID/EPRI Symposium, Orlando, FL (June 1994).
- N61. Farmer, J.P., Hashemian, H.M., "Minimizing the Cost of Instrument Calibrations in Nuclear Power Plants." Presented at the 1994 POWID/EPRI Symposium, Orlando, FL (June 1994).
- N62. Hashemian, H.M., Farmer, J.P., "A Versatile Data Acquisition System For Nuclear Power Plants." Proceedings of the EPRI Nuclear Plant Performance Improvement Seminar, pp. 1–16, Charleston, SC (August 1994).

- N63. Hashemian, H.M., Riner, J.L., "Using On-Line Performance Testing Methods in Developing a Mechanical Integrity Program for Process Sensors." Presented at the American Chemical Industries Week '94, Philadelphia, PA (October 1994).
- N64. Hashemian, H.M., Mitchell, D.W., Petersen, K.M., "Nondestructive Evaluation of the Attachment of Sensors in Solid Materials." Published in Conference Proceedings of JANNAF Nondestructive Evaluation Subcommittee Meeting, Ogden Air Logistics Center, Hill Air Force Base, UT (October 1994).
- N65. Hashemian, H.M., Mitchell, D.W., Petersen, K.M., "New Technology for Testing the Attachment of Sensors in Composite Materials for SRM Nozzles." Presented at the JANNAF Rocket Nozzle Test Subcommittee Meeting, at the Boeing Defense and Space Group, Seattle, WA (November 1994).
- N66. Hashemian, H.M., Black, C.L., "Fiber Optic Pressure Sensors for Nuclear Power Plants." Published in the proceedings of the 22nd Water Reactor Safety Meeting, Bethesda, MD (October 1994).
- N67. Hashemian, H.M., Farmer, J.P., "On-Line Calibration of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants." Proceedings of the 22nd Water Reactor Safety Meeting, Bethesda, MD (October 1994).
- N68. Hashemian, H.M., Jones, C.N., Shell, C.S., Harkelroad, J.D., "New Technology for Testing the Attachment of Sensors to Solid Materials." Presented at the 41st International Instrumentation Symposium, Aurora, CO (May 1995).
- N69. Hashemian, H.M., "Measurement of Primary Coolant Temperatures in Conjunction with Steam Generator Replacement." Presented at the 9th Power Plant Dynamics, Control & Testing Symposium, Knoxville, TN (May 1995).
- N70. Hashemian, H.M., "Application of Neural Networks for On-Line Testing of Calibration of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants." Presented at the 9th Power Plant Dynamics, Control & Testing Symposium, Knoxville, TN (May 1995).
- N71. Hashemian, H.M., Fain, R.E., Riner, J.L., Fidler, C.R., "Development of an Automated System for Diesel Generator Performance Monitoring." Presented at the Fifth International Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, La Jolla, CA (June 1995).
- N72. Hashemian, H.M., Fain, R.E., "Experience With Measurement of Drop Time of Control and Shutdown Rods and Testing of CRDMs in

- Nuclear Power Plants." Presented at the Fifth Intl. Joint Controls and Instrumentation Conference, La Jolla, CA (June 1995).
- N73. Hashemian, H.M., Riner, J.L., Fain, R.E., Fidler, C.R., "Monitoring the Performance of Turbines to Improve Diagnostic Capabilities and Reduce Maintenance Costs." Presented at the Fourth EPRI Turbine/Generator Conference, Milwaukee, WI (August 1995).
- N74. Hashemian, H.M., "Assessment of Fiber Optic Sensors and Other Advanced Sensing Technologies for Nuclear Power Plants." Presented at the 23rd Water Reactor Safety Meeting, NUREG/CP-0149, Vol. 2, pg. 61, Bethesda, MD (October 1995).
- N75. Hashemian, H.M., "In-Situ Testing of the Attachment of Thermocouples, Strain Gages and RTDs to Solid Materials." Presented at the 1995 JANNAF Propulsion and Subcommittee Joint Meetings, Tampa, FL (November 1995).
- N76. Hashemian, H.M., Fain, R.E., Riner, J.L., "Automated Diesel Generator Performance Monitoring for the Reduction of Plant Operating and Maintenance Costs." Presented at the NMAC Diesel Engine Analysis and Monitoring Workshop and Exhibition, Orlando, FL (December 4–5, 1995).
- N77. Hashemian, H.M., Fain, R.E., "Automated Rod Drop Time Testing and Diagnostics in Soviet Designed RBMK and VVER Reactors." Published in NPIC & HMIT 96 Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 1461–1468 (May 1996).
- N78. Hashemian, H.M., Fain, R.E., "Reducing Outage Time Through Automated Tests To Meet Technical Specification Requirements." Published in NPIC & HMIT 96 Conference Proceedings, Vol 2., pp. 1289–1296 (May 1996).
- N79. Hashemian, H.M., "On-Line Monitoring Techniques for Preventive Maintenance, Performance Measurements, and Aging Management in Nuclear Power Plants." Presented at the ANS/ENS International Meeting, Washington, DC (November 1996).
- N80. Hashemian, H.M., "On-Line Monitoring Techniques for Preventive Maintenance, Performance Measurements, and Aging Management In Nuclear Power Plants." Presented at the 7th ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Knoxville, TN (June 1997).
- N81. Hashemian, H.M., "Cross Calibration of Primary Coolant RTDs in Compliance with Recent NRC Position." Presented at the 7th ISA

- POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Knoxville, TN (June 1997).
- N82. Hashemian, H.M., Beverly, D.D., "Maintenance Guide for Control Rod Drive Systems in Westinghouse PWRs." Presented at the 8th ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Scottsdale, AZ (June 1998).
- N83. Hashemian, H.M., "IAEA Guidance on Aging of Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Equipment, Periodical Testing and Maintenance Strategies." Presented at the 8th ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Scottsdale, AZ (June 1998).
- N84. Hashemian, H.M., "Experience with Use of LCSR Test for Measurement of Response Time of Temperature Sensors in Industrial Processes." Presented for the ASTM E20 Committee on Temperature Measurement, Seattle, WA (May 17, 1999).
- N85. Hashemian, H.M., "Advanced Sensor and New I&C Maintenance Technologies for Nuclear Power Plants." Presented at the 7th International Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, St. Petersburg, FL (June 1999).
- N86. Hashemian, H.M., Morton, G.W., "Automated System for Pressure Transmitter Calibration." Presented at the 7th International Joint ISA POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, St. Petersburg, FL (June 1999).
- N87. Hashemian, H.M., Mitchell, D.W., "Examples of Instrumentation Problems in Power Industries." Presented at the 43rd Annual ISA POWID Conference 2000, San Antonio, TX (June 4–9, 2000).
- N88. Hashemian, H.M., et al., "Experience with Rod Drop and CRDM Testing in Nuclear Power Plants." Presented at the 43rd Annual ISA POWID Conference 2000, San Antonio, TX (June 4–9, 2000).
- N89. Hashemian, H.M., "Review of Advanced Instrumentation and Maintenance Technologies for Nuclear Power Plants." Presented at the 43rd Annual ISA POWID Conference 2000, San Antonio, TX (June 4–9, 2000).
- N90. Hashemian, H.M., "Latest Trends in Electric Power Production." Presented at the 43rd Annual ISA POWID Conference 2000, San Antonio, TX (June 4–9, 2000).
- N91. Hashemian, H.M., "Optimized Maintenance and Management of Ageing of Critical Equipment in Support of Plant Life Extension." Presented at the 2000 ANS/ENS International Meeting, Washington, DC (November 12–16, 2000).

- N92. Hashemian, H.M., "Power Upgrading in PWR Plants By Better Measurement of Reactor Coolant Flow." Presented at the 2000 ANS/ENS International Meeting, Washington, DC (November 12–16, 2000).
- N93. Hashemian, H.M., "Increasing Instrument Calibration Intervals." Presented at the 44th Annual ISA POWID Conference 2001, Orlando, Florida (July 7–13, 2001).
- N94. Hashemian, H.M., "Implementation of On-Line Calibration Monitoring in Nuclear Power Plants." Presented at MARCON, Maintenance and Reliability Conference, Knoxville, TN (May 5–8, 2002).
- N95. Hashemian, H.M., "Verifying the Performance of RTDs in Nuclear Power Plants." Presented at the 8th Temperature Symposium, ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Chicago, IL (October 21–24, 2002).
- N96. Hashemian, H.M., "Comparison of RTDs and Thermocouples for Industrial Temperature Measurements." Presented at the 8th Temperature Symposium, ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Chicago, IL (October 21–24, 2002).
- N97. Hashemian, H.M., "LCSR Method to Verify the Attachment of Temperature Sensors and Strain Gauges to Solid Material." Presented at the 8th Temperature Symposium, ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Chicago, IL (October 21–24, 2002).
- N98. Hashemian, H.M., "Extending the Calibration Interval of Pressure Transmitters in Nuclear Power Plants." Presented at the 13th Annual Joint ISA POWID/EPRI Control and Instrumentation Conference, Williamsburg, VA (June 15–20, 2003).
- N99. Hashemian, H.M., "Instrument Calibration Reduction Through On-Line Monitoring." Presented at the 2004 Utility Working Conference & Vendor Technology Expo, American Nuclear Society, Amelia Island, FL (August 8–11, 2004).
- N100. Hashemian, H.M., et al., "Calibration Reduction System Implementation at the Sizewell B Nuclear Power Plant." Presented at the 4th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human Machine Interface Technology, American Nuclear Society, Columbus, OH (September 19–22, 2004).
- N101. Hashemian, H.M., "Temperature Sensor Diagnostics." Proceedings of the 51st International Instrumentation Symposium, ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Knoxville, TN (May 8–12, 2005).

- N102. Tew, W.L., Nam, S.W., Benz, S.P. and Dresselhaus, P., and Hashemian, H.M., "New Technologies for Noise Thermometry with Applications in Harsh and-or Remote Operating Environments." Proceedings of the 51st International Instrumentation Symposium, ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Knoxville, TN (May 8–12, 2005).
- N103. Hashemian, H.M., "Maintenance of Cables in Industrial Processes." Presented at MARCON 2005, Maintenance and Reliability Conference, Knoxville, TN (May 3–6, 2005).
- N104. Hashemian, H.M., "Sensor Performance and Reliability." Presented at the 15th Joint ISA/POWID/EPRI Controls and Instrumentation Conference, Nashville, TN (June 2005).
- N105. Hashemian, H.M., Shumaker, B.D. "On-Line Condition Monitoring Applications in Nuclear Power Plants." Submitted for American Nuclear Society (ANS) Topical Meeting on Nuclear Power Plant Instrumentation and Control and Human Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT), to be held concurrently with the ANS National Winter Meeting, Albuquerque, New Mexico, USA (November 2006).

Патенты (выданные или рассматриваемые)

- P1. Morton, G.W., Shumaker, B.D., Hashemian, H.M., "Cross Calibration of Plant Instruments with Computer Data." Publication No. 2005/0187730 A1, (August 2005) Patent Pending.
- P2. Hashemian, H.M., "Testing of Wire Systems and End Devices Installed in Industrial Processes." Publication No. US 2005/0182581 A1 (August 2005) Patent Pending.
- P3. Hashemian, H.M., "Integrated System for Verifying the Performance and Health of Instruments and Processes." Patent No. US 6,915,237 B2 (July 2005).
- P4. Morton, G.M., Sexton, C.D., Beverly, D.D., Hashemian, H.M., "Nuclear Reactor Rod Drop Time Testing Method." Patent No. US 6,404,835 B1 (July 2002)
- P5. Hashemian, H.M., "Apparatus for Measuring the Degradation of a Sensor Time Constant." Patent No. US 4, 295, 128 (October 1981)
- P6. Hashemian, H.M., "Instrument and Process Performance and Reliability Verification System." Patent No. US 6,973,413 B2 (December 2005).

Приложение В

**Позиция Комиссии по ядерному регулированию США
в отношении перекрестной калибровки ТДС на АЭС**

Позиция Комиссии по ядерному регулированию (NRC) США в отношении перекрестной калибровки ТДС на АЭС содержится в официальном документе, который приводится в данном приложении. На документ ссылаются как на техническое положение 13 в области контрольно-измерительных приборов и систем управления (документ ВТР-13). Этот документ является приложением к главе 7 издания NRC под номером NUREG-0800, который также называют типовым планом экспертизы (оценки) («Standard Review Plan» или SRP).

Примечание: Чтобы обеспечить соответствие оригиналу документа, данное приложение было дословно воспроизведено на основе текста документа NRC и в формате, соответствующем насколько возможно формату оригинального документа NRC.

Новый документ

Приложение 7-А

NUREG-0800

Отраслевое техническое положение НИСВ-13

Руководство по перекрестной калибровке температурных датчиков сопротивления, используемых в системе защиты

А. Исходная информация

Целью данного отраслевого технического положения является определение данных и методов, которые допустимы для использования специалистами с целью применения перекрестной калибровки для проверки работы температурных датчиков сопротивления (ТДС). Это руководство основано на опыте детальной оценки документации, представленной заявителями (держателями лицензий), описывающей применение процедур перекрестной калибровки ТДС, измеряющих температуру теплоносителя реактора, без их демонтажа, а также исследований, проведенных NRC. В дополнение к этому, сотрудниками NRC было завершено рассмотрение документации, представленной заявителями и держателями лицензий, и был сделан вывод, что она удовлетворяет требованиям указанных регламентирующих положений.

Другие методы, например использование иного параметра, также могут применяться для обеспечения реперных значений для перекрестной

корреляции, если будет приведено достаточное обоснование для их применения.

1. Регулирующая основа

Документ 10 CFR 50.55a(h) требует, чтобы системы защиты удовлетворяли критериям стандарта ANSI/IEEE 279 «Критерии для систем защиты АЭС», включая следующие требования:

- Раздел 3(9), касающийся минимальных требований к рабочим характеристикам, включая время реакции и точность,
- Раздел 4.9 «Возможность проверок датчиков»,
- Раздел 4.10 «Возможность проведения проверки и калибровки».

Документ 10 CFR 50, Приложение А, Общие критерии проектирования GDC 13, «Контрольно-измерительные приборы и системы управления» требует, в частности, чтобы имелись приборы для мониторинга переменных параметров и систем и чтобы обеспечивалось управление с целью поддерживать значения этих параметров и работу систем в заданных рабочих диапазонах.

Документ 10 CFR 50, Приложение А, GDC 20 «Функции системы защиты» требует, в частности, чтобы система защиты была сконструирована так, чтобы приводить в действие соответствующие системы с целью гарантировать, что установленные для данной конструкции топлива допустимые пределы не превышаются.

Документ 10 CFR 50, Приложение А, GDC 21 «Надежность и возможность проверки системы защиты» требует, в частности, чтобы система защиты была сконструирована так, чтобы обеспечивать высокую надежность и возможность проверки ее работы в рабочих условиях, соизмеримые с теми защитными функциями, которые она должна выполнять.

Документ 10 CFR 50, Приложение А, GDC 24 «Разделение систем защиты и управления» требует, в частности, чтобы система защиты была отделена от системы управления до такой степени, какая необходима, чтобы отказ любого отдельного компонента или канала системы управления, либо отказ или отключение любого отдельного компонента или канала системы защиты, который является общим для системы защиты, не скажется на функционировании какой-либо одной системы, удовлетворяющей всем требованиям к надежности, резервированию и независимой работе системы защиты.

Документ 10 CFR 50, Приложение А, GDC 29 «Защита от предполагаемых эксплуатационных нарушений» требует, в частности, чтобы системы защиты и управления реактивностью были сконструированы так, чтобы обеспечивать крайне высокую вероятность выполнения их функций обеспечения безопасности в случае любого предполагаемого эксплуатационного нарушения.

2. Руководства, относящиеся к данному вопросу

Регулирующее руководство 1.153 «Критерии для систем безопасности в части энергообеспечения, контрольно-измерительных приборов и систем управления» подтверждает применимость стандарта IEEE 603 «Стандартные критерии IEEE для систем безопасности для АЭС» в качестве альтернативы документа ANSI/IEEE 279. Стандарт IEEE 603 требует, в частности, чтобы проектная база системы безопасности включала следующее:

- Добавка, учитывающая неточности, неопределенность калибровок и ошибки.
- Общие времена реакции системы безопасности, используемые для установления разрешаемого значения уставок.
- Основание для демонстрации того, что предполагаемые значения, используемые для неточности измерительных приборов, неопределенности калибровок и ошибок, а также время реакции приемлемы и допустимы.

Рабочие свойства ТДС характеризуются его точностью и временем реакции. Точность есть мера того, до какой степени ТДС отражает статическое значение температуры, а время реакции показывает, как быстро ТДС реагирует на изменение температуры. Документ NUREG/CR-5560 «Старение ТДС, применяемых на АЭС» содержит утверждение о том, что старение ТДС влияет на их калибровку и время реакции даже при эксплуатации в предусмотренных проектом условиях, но что их старение можно учитывать при помощи периодических испытаний, проводимых во время каждой перегрузки реактора. Документ EPRI TR-106453-3925 «Оценка датчиков температуры» содержит дополнительную информацию о рабочих характеристиках ТДС.

3. Назначение

Назначением данного отраслевого технического документа является предоставление руководящих указаний персоналу NRC, осуществляющих проверку документации, представленной заявителем,

на соответствие процитированным выше регулирующим основам и стандартам. Данный документ преследует две цели:

- Подтвердить, что неопределенности калибровок, неточности и ошибки, связанные с предлагаемым методом перекрестной калибровки, совместимы с основами проектной базой и предположениями, касающимися анализа уставок.
- Подтвердить, что предлагаемый метод перекрестной калибровки достаточен для подтверждения того, что время реакции ТДС совместимо с предположениями, касающимися анализа аварийных ситуаций.

В. Отраслевое техническое положение

1. Введение

Для обеспечения надлежащей работы ТДС следует через определенные интервалы проверять точность и время реакции датчиков. Что касается датчиков, используемых в контуре охлаждения реактора (КОР), степень и методы проверки, подходящие для их калибровки и тестирования без демонтажа, могут ограничиваться практическими соображениями. Периодическое удаление и повторная установка ТДС лишь с целью проверки их калибровки или времени реакции могли бы привести к ошибкам, вызываемым повторной установкой, и к увеличению облучения персонала. К тому же может оказаться невозможным или нецелесообразным достичь диапазон изотермических режимов КОР для проверки без демонтажа полного диапазона калибровки ТДС. Тем не менее заявитель (держатель лицензии) должен предоставить гарантию того, что точность и время реакции каждого ТДС не претерпели значительных изменений из-за старения или ухудшения свойств датчика или его установки.

Одним из методов, подходящим для применения специалистами, является использование эталонного ТДС, который был недавно откалиброван, и время реакции которого было измерено. Остальные «схожие» ТДС можно подвергнуть перекрестной калибровке по отношению к эталонному ТДС для того, чтобы выявить какое-либо значительное ухудшение их рабочих характеристик. «Схожими» ТДС являются те, в отношении которых может быть продемонстрировано, что они эксплуатируются в достаточно схожих условиях, относящихся к температуре и расходу в КОР. Хотя данный метод не обеспечивает полной проверки калибровки каждого ТДС во всем диапазоне, специалисты убедились, что он позволяет обеспечить своевременное обнаружение дрейфа

калибровки или ухудшение характеристик ТДС при условии, что применяются рекомендации настоящего документа. Эти рекомендации касаются следующих аспектов:

- Привязка установленного эталонного ТДС к данным калибровки в лабораторных условиях.
- Допустимые методы тестирования ТДС без демонтажа.
- Измерение времени реакции.
- «Проверочные» и «скорректированные» данные тестирования.
- Взаимосвязь управления и защиты или отказ общего характера во время тестирования без демонтажа.

2. Информация, подлежащая рассмотрению

Информация, подлежащая рассмотрению, включает в себя технические спецификации, чертежи и анализ предлагаемой программы перекрестной калибровки ТДС.

3. Критерии приемлемости

Технический анализ

Для демонстрации полноты и достаточности программы перекрестной калибровки следует предоставить результаты анализа программы технического обслуживания и калибровки приборов. Как минимум, такой анализ должен включать следующее:

- Обоснование того, что программа перекрестной калибровки в должной степени учитывает характеристики ТДС: технические условия на ТДС, диапазон, точность, воспроизводимость, динамическую характеристику, конфигурацию установки, номинальные параметры окружающей его среды, реперную калибровку, предыдущие калибровочные данные и интервалы между калибровками.
- Конкретные методы или процедуры анализа, используемые для преобразования или обработки сигнала (например, осреднение, учет систематической ошибки, обнаружение отказов, определение качества данных и компенсация ошибки).
- Планируемая процедура для перекрестной калибровки и определения времени реакции.
- Обоснование того, что эксплуатационные требования и критерии отказа, принимаемые для целей анализа аварий или происшествий на АЭС, учитываются в процедуре перекрестной калибровки и результатах тестирования в должной степени.

- Техническая основа для критериев приемлемости и выбора точек перекрестной калибровки, являющихся предметом мониторинга без демонтажа во всем диапазоне ТДС с целью обеспечить адекватность данных для обнаружения деградации датчика или систематического дрейфа.

Привязка “на месте” эталонного ТДС к данным калибровки в лабораторных условиях

Калибровка в лабораторных условиях включает в себя измерение сопротивления ТДС при нескольких известных температурах. Полученные данные затем используют для построения калибровочной кривой датчика. Кроме этого, время реакции ТДС может определяться в лабораторных условиях, используя регулируемые ванны с фиксированной температурой и методологию, позволяющую рассчитать время реакции ТДС в диапазоне измерений температуры.

Установка откалиброванного ТДС должна включать процедуру проверки, показывающую применимость времени реакции, полученного из результатов испытаний в лаборатории. Метод реакции на ступенчатое изменение петлевого тока (РСПТ) является удовлетворительным способом для проверки того, что режим работы установленного ТДС адекватно коррелирует с данными лабораторных испытаний.

Измерения времени реакции установленных ТДС при помощи метода РСПТ должны использовать аналитическую методику, такую как преобразование РСПТ, определяемую документом NUREG-0809 «Рассмотрение временных характеристик реакции ТДС», чтобы соотнести результаты испытаний без демонтажа с результатами измерений при разных температурах в условиях лаборатории.

Допустимые методы тестирования без демонтажа

Проверку калибровки ТДС следует выполнять путем установки вновь откалиброванного эталонного ТДС и последующей перекрестной корреляции с измерениями других ТДС, находящихся в тех же условиях относительно температуры и расхода рабочей среды. Критическим элементом такого подхода является получение обоснования того, что все части датчика находятся в достаточно схожих условиях относительно температуры и расхода. Другие методы, как например использование иного параметра для того, чтобы служить эталоном для целей перекрестной корреляции, могут также применяться, если для этого предоставляется достаточное обоснование.

Перед установкой эталонного или нового ТДС он должен быть либо откалиброван в лаборатории, либо, если надлежит использовать калибровочные данные изготовителя, заявитель (держатель лицензии) должен провести анализ или испытание с целью проверить, что ТДС сохранил свою калибровку. Рабочие температуры должны находиться в пределах наиболее широкого диапазона, покрываемого калибровкой изготовителя.

Все данные следует отбирать в изотермических режимах работы станции, и все петли (холодные участки и горячие участки) должны находиться в условиях схожих температур. Если нельзя обеспечить выполнение этого условия, то заявитель (держатель лицензии) должен обеспечить удаление одного или более ТДС с каждого представительного места установки и замену его (их) вновь откалиброванным(и) ТДС.

Заявитель (держатель лицензии) должен представить анализ, в котором указываются пределы допустимой калибровки, время реакции и испытаний ТДС без демонтажа. Процедуры испытаний, вместе с допустимыми критериями, должны указывать пределы калибровки, особенно зависимость полученных данных от степени однородности значений температуры и расхода теплоносителя.

Должны быть установлены поправки или величины систематических отклонений для компенсации неизотермических условий. Так как температурный режим АЭС не может контролироваться абсолютно точно, во время испытаний без демонтажа температура теплоносителя первичного контура может быть подвержена флуктуациям и дрейфу. В данные испытаний должны вноситься поправки на флуктуации и дрейф температуры теплоносителя. Если во время испытаний происходит неполное перемешивание потока теплоносителя реактора, в данные испытаний должна вноситься поправка на разницу в температурах. Температуры теплоносителя реактора должны быть постоянны и однородны. Если данное условие не выполняется, следует вносить в получаемые данные поправки, учитывающие влияние этих факторов.

Аппаратура, используемая для испытаний, должна обладать точностью в установленных пределах и быть устойчивой. См. документ ВТР НИСВ-12, содержащий рекомендации для определения точности измерительной аппаратуры станции.

Измерение времени реакции

Хотя измерение времени реакции не зависит от испытания методом перекрестной калибровки, его следует проводить для существующих и для вновь установленных эталонных датчиков с целью определить влияние процедур установки и обнаружить деградацию датчиков.

Получаемые данные испытаний и последующего анализа должны подтверждать корреляцию для каждого из существующих датчиков, находящихся в общем потоке теплоносителя, с данными по измерению времени реакции датчика в лабораторных условиях, а также с результатами лабораторных измерений времени реакции эталонного датчика. Для установления корреляции с результатами лабораторных испытаний эталонного ТДС может использоваться корреляция между результатами испытаний существующих датчиков методом РСПТ и результатами испытаний РСПТ для эталонного датчика.

«Проверочные» и «скорректированные» данные тестирования

Заявитель (держатель лицензии) должен поддерживать базу данных, содержащих для каждого датчика «проверочные» и «скорректированные» данные калибровок и испытаний времени реакции.

С целью мониторинга систематического дрейфа или деградации датчика вновь откалиброванный ТДС или новый ТДС с недавно полученными калибровочными данными должен устанавливаться в представительном месте или местах, определенных на основании анализа. Мониторинг перекрестной корреляции с эталонным или эталонными ТДС должен проводиться путем регистрации «проверочных» и «скорректированных» данных.

Данные испытаний и проводимый анализ должны обнаруживать и объяснять различия в изотермических режимах и свидетельствовать о том, что дрейф имеет случайный характер и находится в приемлемом диапазоне, как он определен анализом уставок, и что не наблюдается систематического дрейфа. Если предыдущие данные свидетельствуют о потенциальных проблемах дрейфа, который может превысить допустимые значения дрейфа температуры при испытании какого-либо датчика, то заявитель (держатель лицензии) должен проверить калибровку датчика или датчиков, демонстрирующих отклонения, и определить соответствующие действия по исправлению положения. Анализ для предсказания дрейфа ТДС должен предприниматься для всех ТДС, используемых в системе защиты.

Взаимосвязь управления/защиты и отказа группового типа во время тестирования без демонтажа

Если заявитель (держатель лицензии) использует измерительную аппаратуру, являющуюся общей для резервированных каналов, следует обеспечить определенные меры (изолированность) для того, чтобы избежать положения, при котором одиночный отказ распространится на резервированные каналы или вызовет недопустимые связи каналов защиты и управления.

4. Процедуры рассмотрения

С целью установить требования к точности и времени реакции ТДС должна быть изучена проектная база системы защиты.

Метод перекрестной калибровки и данные по калибровке и времени реакции должны быть проанализированы с целью установить неточности, неопределенности и ошибки калибровки, а также подтвердить применимость метода перекрестной калибровки.

Документация (результаты) процесса перекрестной калибровки должна анализироваться относительно критериев приемлемости, представленных выше. Этот анализ должен подтвердить, что процесс калибровки согласуется со всеми допущениями анализа уставок и требованиями проектной базы.

С. Список литературы

ANSI/IEEE Std 279-1971. "Criteria for Protection Systems for Nuclear Power Generating Stations."

EPRI Topical Report TR-106453-3925. "Temperature Sensor Evaluation.." Electric Power Research Institute, June 1996.

IEEE Std 603-1991. "IEEE Standard Criteria for Safety Systems for Nuclear Power Generating Stations."

NUREG-0809. "Review of Resistance Temperature Detector Time Response Characteristics." August 1981.

NUREG/CR-5560. "Aging of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors." June 1990.

Regulatory Guide 1.153. "Criteria for Power, Instrumentation, and Control Portions of Safety Systems." Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1996.

Приложение С

Регулирующее руководство 1.118 „Периодическое испытание систем электроснабжения и защиты“¹

¹ На документ дана ссылка в Главе 6 данной книги. Текст этого приложения воспроизведен с сайта NRC.

РЕГУЛИРУЮЩЕЕ РУКОВОДСТВО 1.118 «ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЗАЩИТЫ»

Редакция 3

Апрель 1995 г.

А. Введение

Раздел 50.55a «Законы и стандарты» документа 10 CFR, часть 50 «Национальное лицензирование производственных установок» в параграфе (h) «Системы защиты» содержит положение о том, что системы защиты должны удовлетворять требованиям, изложенным в стандарте 279 Института инженеров по электротехнике и электронике «Критерии для систем защиты АЭС» ⁽¹⁾. Раздел 4.9 стандарта IEEE 279-1971 требует, в частности, наличия способа проверки эксплуатационной готовности каждого датчика на входе системы защиты и включает примеры того, как этого можно достигнуть. Раздел 4.10 стандарта IEEE 279-1971 требует, в частности, чтобы имелась возможность испытания и калибровки оборудования систем защиты, помимо датчиков, и указывает, когда такое оборудование должно испытываться во время работы реактора.

Общий критерий проектирования (General Design Criterion) 21 «Надежность и тестируемость систем защиты», содержащийся в Приложении А «Общие критерии проектирования для АЭС» документа 10 CFR, часть 50, требует, в частности, чтобы конструкция системы защиты позволяла периодическое проведение ее испытаний во время работы реактора, включая возможность испытывать каналы индивидуально для обнаружения отказов и потери резервирования, которые могли иметь место. Общий критерий проектирования 18 «Инспекция и испытания систем электроснабжения» требует, в частности, чтобы конструкции систем электроснабжения, важных для обеспечения безопасности, позволяли проводить их периодические испытания, включая испытания функционирования компонентов системы и системы в целом. Испытания должны проводиться в условиях, приближающихся, насколько это практически возможно, к предусмотренным в проекте, и должны покрывать полный рабочий цикл, включая работу частей системы защиты, а также передачу мощности между блоком АЭС, системой энергоснабжения вне площадки станции и системой энергоснабжения на площадке. Критерий XI «Управление испытанием» Приложения В «Критерии обеспечения качества для АЭС и заводов по переработке топлива» документа 10 CFR, часть 50 требует, в частности, чтобы была разработана программа испытаний с целью обеспечения того, чтобы все проверки были определены и проводились в соответствии с письменными процедурами испытаний, включая эксплуатационные проверки, необходимые для демонстрации того, что системы и компоненты будут работать удовлетворительно в рабочем режиме.

Это регулирующее руководство описывает приемлемый для персонала NRC метод, удовлетворяющий требованиям Комиссии в отношении периодических испытаний систем электроснабжения и защиты.

Настоящее руководство было обсуждено с Консультационным комитетом по гарантиям для реакторов и было им поддержано.

Вся деятельность по сбору информации, упоминаемая в данном регулирующем руководстве, отражена в виде требований в документе 10 CFR, часть 50, который является регулирующей основой для данного руководства. Требования по сбору информации документа 10 CFR, часть 50 были одобрены Административно-бюджетным управлением при президенте США (Office of Management and Budget), номер одобрения 3150-0011.

В. Обсуждение

Стандарт IEEE 338-1987⁽¹⁾ «Критерии для периодических контрольных испытаний систем безопасности АЭС» был разработан Рабочей группой 3.0 Подкомитета 3 «Эксплуатация, контроль и испытания» Комитета инженерных аспектов ядерной энергетики Института инженеров по электротехнике и электронике США и был одобрен Бюро стандартов этого института 10 сентября 1987 г. (и подтвержден в 1993 году). Этот стандарт устанавливает конструкционные и эксплуатационные критерии для проведения периодических испытаний как части программы надзора за системами безопасности АЭС. Периодические испытания состоят из функциональных испытаний и тестов, проверки калибровки и измерений времени реакции, насколько это необходимо, с целью контроля выполнения системой безопасности определенных для нее функций. Состояние системы, связанная с ней документация, интервалы между испытаниями и процедуры испытаний во время работы станции также освещены в этом документе.

С. Позиция регулятора

Соответствие требованиям стандарта IEEE 338-1987 «Критерии для периодических контрольных испытаний систем безопасности АЭС» означает, что метод является приемлемым для персонала NRC с точки зрения выполнения указаний Комиссии в отношении периодического испытания систем защиты и электроснабжения, если соблюдаются следующие исключения:

1. Определения «системы безопасности», «функции безопасности» и «группы безопасности» стандарта IEEE 603-1991⁽¹⁾ «Критерии для систем безопасности АЭС» используются вместо определений стандарта IEEE 338-1987.
2. Как раздел 5(15), так и раздел 6.4(5) стандарта IEEE 338-1987 заменяются на следующий текст:

Процедуры для периодических испытаний не будут требовать использования временных испытательных соединений за исключением указанного ниже:

- (1) Временная проволочная перемычка может использоваться для систем безопасности, которые обеспечены устройствами, специально сконструированными для присоединения переносной испытательной аппаратуры. Эти приспособления должны рассматриваться как часть системы безопасности

и должны удовлетворять всем требованиям стандарта IEEE 338-1987.

- (2) Удаление предохранителей или размыкание выключателя разрешается лишь в случае, когда такое действие приводит к выключению соответствующего канала или приводит в действие логику соответствующей группы нагрузки.
- (3) Процедуры испытаний или административный контроль должны обеспечить проверку разомкнутого контура или проверку, что временные соединения восстанавливаются после испытания.

3. Описание функционального теста системы логики, как отмечено в разделе 6.3.5 стандарта IEEE 338-1987, подразумевает включение в проверку и самого датчика. Функциональный тест системы логики должен быть тестом всех логических компонентов (т.е. всех реле и контактов, блоков аварийного сброса, полупроводниковых логических элементов и т.д.) логической цепи, начиная настолько близко к датчику, насколько это практически возможно, и вплоть до приводимого в действие исполнительного устройства, но не включая его; целью теста является проверка работоспособности цепи.

D. Применение

Целью данного раздела является предоставление информации заявителям и держателям лицензий о планах персонала NRC относительно использования этого руководства.

За исключением случаев, когда заявитель предлагает приемлемый альтернативный метод с целью удовлетворить требованиям указанных частей предписаний Комиссии, для оценки документации, подаваемой в связи с заявлениями на выдачу разрешений на строительство и лицензий на эксплуатацию, будет применяться метод, описываемый в данном руководстве. Он будет также использоваться для оценки документации от тех, кто имеет лицензии на право эксплуатации реакторов и кто предлагает добровольно иницируемые им модификации систем, если имеется ясно выраженная связь между предлагаемой модификацией и данным руководством.

Заявление о полезности и последствиях

Проект заявления о полезности и последствиях данного документа был опубликован вместе с проектом руководства для получения замечаний от общественности (задача DG-1028, сентябрь 1994). Внесение в документ каких-либо изменений не оказалось необходимым, поэтому отдельное заявление о полезности и последствиях данного руководства в окончательной редакции подготовлено не было. Копию проекта заявления о полезности и последствиях этого документа можно получить за плату для изучения или копирования в Публичной библиотеке Комиссии по ядерному регулированию США по адресу 2120L Street NW, Washington, DC, со ссылкой на задачу DG-1028.

Примечания

1. Копии документа могут быть приобретены через Институт инженеров по электротехнике и электронике США, по адресу 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA.

ПРИЛОЖЕНИЕ D

Информационное сообщение NRC 92-33
«Влияние демпферов на время реакции датчиков
давления на АЭС»

Приложение содержит информационное сообщение Комиссии по ядерному регулированию (NRC) по вопросу использования демпферов в измерительных линиях АЭС.

Примечание: Согласно требованиям, предъявляемым к публикациям, данный документ воспроизведен дословно с документа NRC и его формат воспроизводит как можно точнее формат оригинального документа.

Соединенные Штаты Америки

Комиссия по ядерному регулированию США

Вашингтон, DC 20555

30 апреля 1992 г.

Информационное сообщение
NRC 92-33

Увеличение времени реакции датчика при установке устройств демпфирования давления

Адресаты

Все держатели лицензий на эксплуатацию или строительство атомных энергетических реакторов.

Цель

Комиссия по ядерному регулированию США (NRC) выпускает данное информационное сообщение с целью предупредить адресаты об увеличении времени реакции приборов, измеряющих давление, которое происходит при установке в измерительных линиях приборов устройств демпфирования давления. Ожидается, что получатели этой информации изучат ее на предмет применимости сообщаемых данных к своим установкам и рассмотрят меры, насколько это уместно, для того чтобы избежать возникновения подобных проблем. Предложения, содержащиеся в данном сообщении, однако, не являются требованиями NRC, и поэтому не требуется принимать какие-либо конкретные меры или направлять письменный ответ.

Описание обстоятельств

25 сентября 1991 г. корпорация GPU Nuclear Corporation, обладающая лицензией на эксплуатацию АЭС Oyster Creek, инициировала останов АЭС после обнаружения того, что семь из восьми датчиков давления, используемые для сигнализации о разрыве линий изолирующих конденсаторов, не отвечали техническим требованиям станции в отношении времени реакции приборов. Поиск неисправности специалистами станции привел к обнаружению того, что увеличение времени реакции было вызвано наличием устройств демпфирования давления в измерительных линиях этих дифференциальных датчиков. Более того, держатель лицензии обнаружил, что временная задержка, вызываемая этими устройствами, является значительной как при низких, так и при высоких давлениях.

Обсуждение

Устройства демпфирования давления (демпферы), которые используют элементы из спеченной нержавеющей стали, обычно устанавливают в измерительных линиях приборов с целью ослабить колебания давления или защитить приборы от загрязнения микрочастицами.

После того, как датчики не удовлетворили требованиям к времени реакции во время надзорных испытаний, держатель лицензии изучил систему измерения давления и обнаружил, что причиной неприемлемых задержек во времени являлись демпферы. Были установлены датчики Barton улучшенной конструкции, а демпферы были удалены, так как в них отпала необходимость в связи с установкой новых датчиков.

Задержка во времени реакции из-за демпферов не обнаруживается при измерениях времени реакции, выполняемых непосредственно у чувствительного прибора (см. рис. 1). Влияние демпферов различно для разных датчиков из-за различия в объеме вытесняемой жидкости-наполнителя механизмов датчика, реагирующих на изменение давления. Время реакции системы может также ухудшаться при накоплении загрязнений в демпферах измерительных линий.

Бюро исследований по ядерному регулированию NRC проводит общее исследование функционирования приборов измерения давления на АЭС. Сотрудники NRC планируют опубликовать его результаты в документе NUREG/CR 5851 «Долгосрочная работа и характеристики старения датчиков давления на АЭС». Часть этой работы завершена и результаты испытаний по определению времени реакции датчиков давления были опубликованы в документе Общества специалистов по

измерительным устройствам и автоматическим системам США ISA 91-720 «Испытания времени реакции датчиков давления на АЭС». Эта публикация рассматривает различные причины замедления реакции датчиков и документально подтверждает, что может происходить значительное увеличение времени реакции.

Данное информационное сообщение не требует принятия каких-либо конкретных мер или письменного ответа. Если у вас имеются вопросы относительно информации в этом сообщении, пожалуйста, свяжитесь с одним из специалистов, указанных ниже, или с руководителем проекта в соответствующем Бюро регулирования по ядерным реакторам (NRR).

Чарльз И. Росси, директор
Отдел оценок эксплуатационных происшествий
Бюро регулирования по ядерным реакторам

Технические специалисты: Томас Коши, NRR
(301) 504-1176
Игбал Ахмед, NRR
(301) 504-3252

Приложения:

1. Рис. D1. Схема испытаний, позволяющая избежать влияния демпферов
2. Перечень недавно выпущенных информационных сообщений NRC

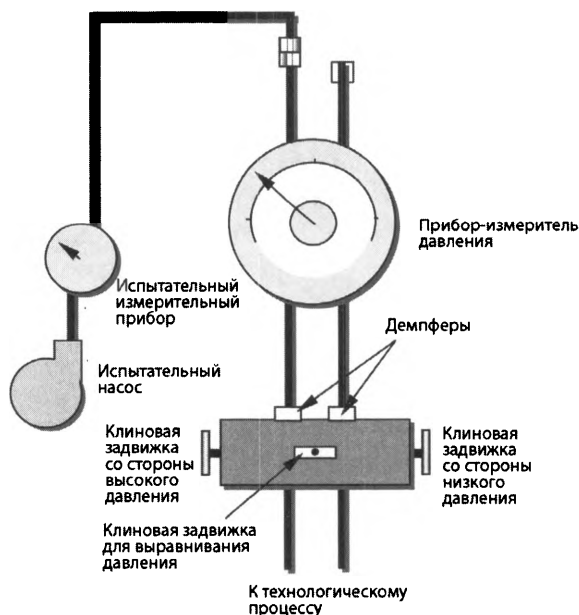


Рис. D1. Схема испытаний, позволяющая избежать влияния демпферов

Примечание: Скопировано с оригинала Информационного сообщения NRC 92-33.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Документы NRC по проблеме потери масла в датчиках давления на АЭС

Это приложение содержит два документа NRC по поводу потери масла в датчиках давления на АЭС:

- (1990 г.) – Бюллетень NRC № 90-01: «Потеря масляного наполнителя в датчиках, изготовленных фирмой Rosemount»
- (2004 г.) – Выпуск NRC 176: «Потеря масляного наполнителя в датчиках Rosemount»

Первый документ (Бюллетень №90-01) описывает суть проблемы потери масляного наполнителя и ее возможные последствия, а второй документ (Выпуск 176) предоставлен NRC с целью закрыть вопрос о потере масла датчиками в атомной промышленности.

№ OMB: 3150-0011

NRCB 90-01

Соединенные Штаты

Комиссия по ядерному регулированию США

Бюро регулирования по ядерным реакторам

Вашингтон, DC 20555

9 марта 1990 г.

Бюллетень NRC № 90-01

«Потеря масляного наполнителя в датчиках, изготовленных фирмой Rosemount»

Адресаты

Все держатели лицензий на эксплуатацию или строительство атомных энергетических реакторов.

Цель

Этим бюллетенем адресатов просят без промедления выработать и осуществить соответствующие корректирующие меры в отношении датчиков модели 1153, серия В, модели 1153, серия D и модели 1154, изготовленных фирмой Rosemount, из которых может наблюдаться утечка масляного наполнителя.

Описание обстоятельств

Информационное сообщение NRC №89-42 «Отказы датчиков Rosemount моделей 1153 и 1154» от 21 апреля 1989 г. было выпущено с целью предупредить промышленность о серии отказов датчиков давления и дифференциальных датчиков давления моделей 1153 и 1154 фирмы Rosemount. Уведомления об отказах этих датчиков поступили между мартом и октябрём 1987 г. с блока 3 АЭС Millstone, принадлежащей компании Northeast Utilities. Последующее исследование причин отказов фирмой Rosemount подтвердило, что неисправность датчиков заключалась в постепенной утечке масляного наполнителя из герметизированного чувствительного модуля датчика.

Обсуждение значимости с точки зрения безопасности

Рабочие характеристики датчика, из которого вытекает масляный наполнитель, постепенно ухудшаются, и датчик, в конце концов, может выйти из строя. Хотя у некоторых вышедших из строя датчиков перед отказом наблюдались признаки утечки масла, было отмечено, что в некоторых случаях может оказаться затруднительным обнаружить во время работы АЭС отказ датчика, теряющего масло. Необнаруженный отказ датчика имеет более серьезные последствия для надежности инженерных систем безопасности, чем отказ, который был бы легко замечен во время нормальной работы. Например, неисправности электронных компонентов обычно обнаруживаются либо путем наблюдения за показаниями измерительного канала, либо во время периодических надзорных испытаний. Отказы датчиков, которые трудно обнаружить, повышают вероятность отказов группового типа и могут привести к тому, что система безопасности, которую это затрагивает, не будет выполнять возложенную на нее функцию защиты. Возможность отказов группового типа вызывает повышенное беспокойство в том случае, если конструкция датчика особенно подвержена утечке масляного наполнителя.

Обсуждение

Датчики Rosemount моделей 1151, 1152, 1153 и 1154 широко используются на АЭС. Датчики моделей 1153 и 1154 поставляются фирмой Rosemount в качестве оборудования, удовлетворяющего как требованиям сейсмостойкости, так и условиям окружающей среды. Датчики модели 1152 поставляются только как сейсмостойкое оборудование. Датчики модели 1151 поставляются как обычное коммерческое оборудование.

До настоящего времени фирма Rosemount сообщила о том, что подтвердился отказ приблизительно 91 датчика моделей 1153 серии В, 1153 серии D и 1154, вызванный потерей масляного наполнителя из-за нарушения герметичности соединения стекла и металла. Так как чувствительный модуль герметичен, утечка масляного наполнителя не может быть обнаружена визуально без разрушения модуля. Рассмотрение сотрудниками NRC этой проблемы привело к обнаружению дополнительного числа датчиков моделей 1153 и 1154, у которых имелись признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, и о которых, возможно, не было сообщено фирме Rosemount. Таким образом, число датчиков моделей 1153 и 1154, имевших утечку масляного наполнителя, по всей вероятности, выше того числа, которое подтвердила фирма.

В силу того, что в конструкции датчиков указанных выше моделей предусмотрено наличие металлического тороидального кольца, данные модели особенно легко подвержены утечке масляного наполнителя из-за нарушения герметичности уплотнения между стеклом и металлом. Поэтому сотрудники NRC считают, что повышенная вероятность развития в этих датчиках утечки масляного наполнителя оправдывает проведение по отношению к ним более интенсивной программы надзорного наблюдения. В дополнение к этому, фирма Rosemount выяснила, что в некоторых партиях датчиков моделей 1153 серии В, 1153 серии D и 1154 наблюдалась повышенная доля приборов, вышедших из строя. Согласно документу 4 в списке литературы, представленном ниже, фирма предоставила промышленности конкретную информацию, позволяющую обнаружить датчики, принадлежащие к этим проблемным партиям. В этой связи персонал NRC считает, что такая повышенная опасность по отношению к утечке масла оправдывает отказ от использования датчиков из этих партий в системах защиты реактора или системах приводов, связанных с инженерными системами обеспечения безопасности.

Фирма Rosemount указала, что также подтвердился выход из строя датчиков моделей 1151 и 1152 из-за утечки масляного наполнения. Конструкция датчиков моделей 1151, 1152 и 1153 серии А аналогична конструкции датчиков моделей 1153 серии В, 1153 серии D и 1154 (т.е., применение уплотнения между стеклом и металлом) за исключением того, что в конструкцию датчиков моделей 1151, 1152 и 1153 серии А включено упругое тороидальное кольцевое уплотнение вместо металлического кольца. Персонал NRC в настоящее время не имеет достаточной информации для того, чтобы эффективно рассмотреть подверженность датчиков моделей 1151, 1152 и 1153 серии А утечке

масляного наполнителя. Поэтому, чтобы получить соответствующие данные по опыту эксплуатации этих датчиков, адресатов просят докладывать о датчиках моделей 1151, 1152 и 1153 серии А, также как и о датчиках моделей 1153 серии В, 1153 серии D и 1154, у которых были выявлены признаки потери масляного наполнителя или в отношении которых было предоставлено подтверждение в Систему данных о надежности АЭС (Nuclear Plant Reliability Data System, или NPRDS), о том, что утечка масляного наполнителя произошла. В дополнение к этому, хотя в данном бюллетене не выдвигается требование об усиленной программе надзорного наблюдения за датчиками моделей 1151, 1152 и 1153 серии А, адресатам рекомендуется предпринять эти меры в отношении тех датчиков моделей 1151, 1152 и 1153 серии А, которые используются либо в системах, связанных с обеспечением безопасности, либо в системах, установленных в соответствии с положением 10 CFR 50.62 («правилом ATWS»).

Фирма Rosemount указала, что в производственный процесс были введены дополнительные меры контроля и обеспечения качества и измененные технические требования в отношении крутящего момента, прикладываемого к болтам, с целью понизить уровни усталостных напряжений. Эти изменения должны свести к минимуму подверженность датчиков моделей 1153 серии В, 1153 серии D и 1154 выходу из строя из-за утечки масляного наполнения. В результате фирма Rosemount указала, что датчики этих типов, изготовленные после 11 июля 1989 г., более не подпадают под действие фирменного уведомления 10 CFR, часть 21, от мая 1989 г. Сотрудники NRC не получили до настоящего времени данных по опыту работы датчиков, которые показывают, что датчики моделей 1153 серии В, 1153 серии D и 1154, изготовленные после 11 июля 1989 г., подвержены утечкам масляного наполнителя в той же степени, как и датчики, изготовленные до этой даты. В соответствии с этим, хотя данный бюллетень не содержит требования усиленного надзорного наблюдения за датчиками этих типов, изготовленными после 11 июля 1989 г., адресатам рекомендуется предпринять эти меры в отношении таких датчиков, если они используются либо в системах, связанных с обеспечением безопасности, либо в системах, установленных в соответствии с положением 10 CFR 50.62 («правилом ATWS»). В дополнение к этому, в соответствии с требованиями отчетности, содержащимися в данном бюллетене, должна предоставляться информация в отношении тех датчиков моделей 1153 серии В, 1153 серии D и 1154, изготовленных после 11 июля 1989 г., у которых наблюдаются признаки, свидетельствующие об утечке масляного

наполнителя, или для которых подтверждено, что утечка масляного наполнителя произошла.

Персонал NRC призывает эксплуатирующие организации проводить совместную работу под руководством технической промышленной организации по разработке и анализу базы данных по опыту работы, покрывающей все модели датчиков Rosemount. Сотрудники NRC будут продолжать получать и анализировать данные по опыту эксплуатации датчиков моделей 1151, 1152, 1153 и 1154. Если потребуется, будут предприняты дополнительные регуляторные действия, такие как требование расширения усиленной деятельности по надзорному наблюдению на датчики моделей 1151, 1152 и 1153 серии A, а также датчики моделей 1153 серии B, 1153 серии D и 1154, изготовленные фирмой Rosemount после 11 июля 1989 г., или требование замены датчиков из дополнительных проблемных партий.

Адресаты могли получить датчики, изготовленные фирмой Rosemount или которые содержат чувствительные модули этого производителя, из различных источников. Представленная ниже информация дается для того, чтобы облегчить идентификацию адресатами тех датчиков, которые были произведены фирмой Rosemount или которые содержат чувствительные модули этой фирмы:

- Фирма Rosemount указала, что существуют не авторизованные изготовители и переоснащающие фирмы для датчиков модели 1151. Не авторизованные изготовители или переоснащающие фирмы могут также иметь место и для датчиков моделей 1152, 1153 и 1154.
- Все датчики моделей 1153 и 1154, полученные непосредственно от фирмы Rosemount через поставщиков-посредников или поставленные в качестве неотъемлемой части другого компонента оборудования (например, аварийного дизель-генератора), должны (а) иметь указание на изготовление фирмой Rosemount, (б) иметь ясно выраженное указание модели и серийного номера фирмы, (в) обладать внешними параметрами, характерными для датчика фирмы Rosemount, и (г) иметь корпус голубого цвета или корпус из нержавеющей стали. Фирма Rosemount указала, что датчики моделей 1153 и 1154 не предоставляются другим изготовителям для перепродажи под другим фирменным названием. В дополнение к этому, в приложении 1 приведена упрощенная диаграмма, описывающая типичные физические характеристики датчика фирмы Rosemount.

- Датчики модели 1152, за исключением тех, что указаны ниже, должны (а) иметь указание на изготовление фирмой Rosemount, (б) иметь ясно выраженное указание модели и серийного номера фирмы и (в) иметь корпус голубого цвета или корпус из нержавеющей стали. Фирма Rosemount указала, что она поставляла чувствительные модули датчика модели 1152 фирме Barley Controls (ранее имевшей название Barley Meter). Эта фирма изготавливала датчики, которые содержат чувствительные модули Rosemount модели 1152 и имеют корпуса серого цвета, по внешнему виду слегка отличающиеся от корпусов датчиков Rosemount.
- Датчики модели 1151, за исключением тех, что указаны ниже, должны (а) иметь указание на изготовление фирмой Rosemount, (б) иметь ясно выраженное указание модели и серийного номера фирмы, (в) обладать внешними параметрами, характерными для датчика фирмы Rosemount, и (г) иметь корпус голубого цвета. Датчики модели 1151, изготовленные фирмой Rosemount, могли поставляться для использования на АЭС другими первичными изготовителями оборудования. Эти датчики должны обладать внешними параметрами, характерными для датчика фирмы Rosemount, и иметь корпус голубого цвета. Фирма Fisher Controls может также предлагать для продажи под своим фирменным названием датчики модели 1151, купленные у фирмы Rosemount. Эти датчики должны обладать внешними параметрами, характерными для датчика фирмы Rosemount, но иметь корпус зеленого цвета.

Самым ранним признаком того, что датчик модели 1153 серии В, 1153 серии D или 1154 теряет масляный наполнитель, заметным во время обычной эксплуатации перед его отказом, является:

- постоянный дрейф.

Признаки того, что датчик модели 1153 серии В, 1153 серии D или 1154 теряет масляный наполнитель, которые заметны во время обычной эксплуатации после отказа датчика или непосредственно перед его выходом из строя, включают в себя:

- постоянный дрейф,
- внезапный уменьшающийся дрейф (для избыточного высокого давления или абсолютной величины давления),
- изменение в шумах технологического процесса, включая изменения амплитуды, «односторонний шум» или несимметричное распределение шума,

- замедленную реакцию или неспособность следовать плановым или незапланированным переходным процессам на АЭС.

Признаки того, что датчик модели 1153 серии В, 1153 серии D или 1154 теряет масляный наполнитель, которые заметны во время проведения калибровки, включают в себя:

- неспособность измерять давление во всем рабочем диапазоне,
- замедленную реакцию на увеличивающееся или на уменьшающееся давление,
- постоянный дрейф нуля или рабочего диапазона.

Персонал NRC считает, что эти признаки могут быть также использованы для обнаружения тех датчиков моделей 1151, 1152 и 1153 серии А, которые могут быть подвержены утечке масляного наполнителя.

Персонал NRC рассмотрел информацию, предоставленную фирмой Rosemount, в том числе публикации 1, 2, 3 и 4, указанные ниже в списке литературы, с целью помочь промышленности обнаружить датчики, в которых может иметь место утечка масляного наполнителя. Сотрудники NRC пришли к выводу, что фирма Rosemount предоставила достаточную базовую информацию, чтобы подкрепить предложенные ей диагностические процедуры (выявление тенденций в калибровочных и эксплуатационных данных, замедленную реакцию при переходных процессах и анализ шумов технологического процесса), направленные на обнаружение датчиков, в которых может иметь место утечка масляного наполнителя. В соответствии с этим, целью действий, которые требуются данным бюллетенем, является отражение этих диагностических процедур. Однако персонал NRC заключил, что фирма Rosemount не предоставила достаточной базовой информации, чтобы подкрепить предложенную ею методологию (соотношение между давлением и сроком службы) для определения, какие датчики должны подпадать под усиленную программу надзорного наблюдения. В частности, персонал NRC считает, что методология, применяемая фирмой Rosemount для поддержки предложенных ей критериев, учитывающих соотношение между давлением и сроком службы, для нахождения датчиков, которые должны подпадать под усиленную программу надзорного наблюдения, не дает требующейся высокой степени уверенности в том, что такой вид отказов не будет иметь место.

Фирма Rosemount вначале указала на то, что датчики моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154, в которых происходит утечка масляного наполнителя, должны выходить из строя в течение примерно первых

36 месяцев эксплуатации. Недавно полученные данные говорят о том, что частота возникновения утечки масляного наполнителя зависит от области применения и от давления. Хотя датчики, постоянно подверженные высокому давлению (например, давлению в работающем реакторе), могут отказать в этих временных рамках, выход из строя датчиков, применяемых в системах низкого давления, или датчиков, не подвергающихся постоянному высокому давлению, может произойти в течение более длительного отрезка времени.

Общий критерий проектирования (General Design Criterion) 21 «Надежность и возможность проверки системы защиты» документа 10 CFR 50, приложение А требует, чтобы конструкция системы защиты обеспечивала высокую функциональную надежность и достаточную возможность проведения периодической проверки ее функционирования во время работы реактора с тем, чтобы можно было оперативно обнаруживать отказы подкомпонентов или подсистем внутри системы защиты, а также потерю требуемого резервирования системы защиты, как только это происходит. Документ 10 CFR 50.55a(h) требует, чтобы системы защиты удовлетворяли стандарту Института инженеров по электротехнике и электронике США «Критерии для систем защиты АЭС» (IEEE-279). Этот стандарт указывает, что должны быть предусмотрены меры для проверки с высокой степенью надежности во время работы реактора эксплуатационной готовности каждого датчика на входе в систему. Таким образом, персонал NRC заключает, что установки, где используются датчики, которые могут быть особенно подвержены утечке масляного наполнителя, возможно, не полностью удовлетворяют вышеуказанным предписаниям потому, что может произойти отказ датчика, который останется необнаруженным. В связи с этим, персонал NRC требует, чтобы адресаты выполняли действия, сформулированные ниже.

Требуемые действия:

Работающие реакторы

Все держатели лицензий на эксплуатацию ядерных энергетических реакторов в срок не позднее 120 дней после получения данного бюллетеня должны произвести следующее:

1. Установить наличие датчиков давления или дифференциальных датчиков моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154, за исключением датчиков этих моделей, изготовленных фирмой Rosemount после 11 июля 1989 г., которые используются либо

в системах, связанных с обеспечением безопасности, либо в системах, установленных в соответствии с документом 10 CFR 50.62 («правилом ATWS»).

2. Определить, принадлежат ли какие-либо из датчиков, обнаруженных в соответствии с п. 1 выше, партиям изготовителя, которые были охарактеризованы фирмой Rosemount как имеющие высокий процент отказов из-за утечки масляного наполнителя. Требуется, чтобы адресаты не использовали датчики из этих проблемных партий в системах защиты реактора или системах приводов, связанных с обеспечением безопасности; поэтому требуется, чтобы адресаты разработали и осуществили при первой подходящей возможности программу замены датчиков из этих партий, которые используются в системах защиты реактора или системах приводов, связанных с обеспечением безопасности.
3. Рассмотреть документацию АЭС (например, документацию последних трех калибровок), связанную с датчиками, определенными в п. 1 выше, на предмет определения того, не имеются ли у каких-либо из этих датчиков уже заметные признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя. Следует разработать соответствующие критерии того, что датчики удовлетворяют эксплуатационным требованиям, и применить эти критерии к датчикам, определенным на основе вышеуказанного рассмотрения как имеющим признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя. Датчики, определенные как имеющие признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, которые не удовлетворяют вышеуказанным критериям пригодности для эксплуатации, должны быть проверены на соответствие действующим техническим требованиям. Датчики, определенные как имеющие признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, которые не удовлетворяют критериям пригодности для эксплуатации и которые не удовлетворяют действующим техническим требованиям, следует заменить при первой подходящей возможности.
4. Разработать и осуществить усиленную программу надзорного наблюдения с целью мониторинга датчиков, определенных в п. 1 выше, на предмет наличия признаков утечки масляного наполнителя. Эта усиленная программа наблюдения должна предполагать следующие действия или эквивалентные им:

- а) Обеспечение того, чтобы соответствующий персонал держателя лицензии был осведомлен о признаках утечки масляного наполнителя из датчика, которые могут возникнуть как во время работы, так и во время калибровки, и о необходимости безотлагательного распознавания датиков, у которых наблюдаются эти признаки.
 - б) Усиленный мониторинг датчиков с целью обнаружить у них постоянный дрейф.
 - в) Рассмотрение поведения датчика после запланированного или незапланированного переходного процесса на АЭС или испытания с целью обнаружить замедленную реакцию датчика.
 - г) Повышенное внимание к замедленной реакции датчика в ответ на повышение или понижение испытательного давления при проведении калибровки.
 - д) Разработка и осуществление программы для обнаружения изменений в шумах технологического процесса.
 - е) Разработка и применение к датчикам, определенным как имеющие признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, критериев пригодности для эксплуатации. К датчикам, которые определены как имеющие признаки утечки масляного наполнителя и которые не удовлетворяют критерии пригодности для эксплуатации, должны быть приняты меры в соответствии с надлежащими техническими требованиями. Датчики, определенные как имеющие признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, которые не удовлетворяют критериям пригодности для эксплуатации и которые не удовлетворяют действующим техническим требованиям, следует заменить при первой подходящей возможности.
5. Документировать и поддерживать в соответствии с существующими процедурами АЭС условия для продолжения эксплуатации станции в период от настоящего времени до времени, когда датчики моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154 из партий изготовителя, которые были охарактеризованы фирмой Rosemount как имеющие высокий процент отказов из-за утечки масляного наполнителя и которые используются в системах защиты реактора или системах приводов, связанных с обеспечением безопасности, смогут быть заменены. В дополнение к этому, в то время как будут выполняться действия, описанные выше,

адресаты могут определить датчики, имеющие признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, которые не удовлетворяют установленным критериям пригодности для эксплуатации и которые не удовлетворяют действующим техническим требованиям. По мере того как такие датчики обнаруживаются, упомянутые выше условия для продолжения эксплуатации станции должны подвергаться обновлению для принятия мер к этим датчикам на период времени с момента их обнаружения до такого времени, когда эти датчики смогут быть заменены. При разработке и обновлении этих условий для продолжения эксплуатации станции адресаты могут рассмотреть вопрос о многообразии типов и резервировании датчиков, различных функциях отключения (отдельная функция отключения, которая может также подавать соответствующий сигнал отключения), специальных испытаниях системы и/или компонентов или (если необходимо) немедленной замене некоторых проблемных датчиков.

Держатели разрешений на строительство

1. Все держатели разрешений на строительство, которые ожидают получения лицензии на эксплуатацию в срок не позднее, чем 120 дней после получения этого бюллетеня, должны выполнить пункты мероприятий 1, 2, 4 и 5, требуемых для выполнения на работающих реакторах в срок не позднее, чем 120 дней после получения этого бюллетеня.
2. Все держатели разрешений на строительство, которые не ожидают получения лицензии на эксплуатацию в течение 120 дней после получения этого бюллетеня, должны перед датой, запланированной для загрузки топлива, завершить выполнение пунктов 1 и 4 действий, требуемых для работающих реакторов, путем:
 - а) Нахождения и замены датчиков моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154 из партий изготовителя, которые были охарактеризованы фирмой Rosemount как имеющие высокий процент отказов из-за утечки масляного наполнителя и которые установлены в системах защиты реактора или системах приводов, связанных с обеспечением безопасности.
 - б) Документирования и поддерживания в соответствии с существующими процедурами АЭС условий для продолжения эксплуатации станции, определяющих меры по отношению к датчикам, продемонстрировавшим после загрузки топлива признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, которые не удовлетворяют установленным критериям при-

годности для эксплуатации, и которые не удовлетворяют действующим техническим требованиям, на период от времени, когда эти датчики будут обнаружены, до того времени, когда эти датчики смогут быть заменены.

Требования по отчетности

Работающие реакторы

1. Представить в срок не позднее, чем 120 дней после получения этого бюллетеня, ответ, который:
 - а) Подтверждает, что выполнение мероприятий в соответствии с пунктами 1, 2, 3, 4 и 5, требуемых для работающих реакторов, завершено.
 - б) Содержит данные об изготовителе датчика, указанном на его корпусе; номер модели; систему, в которой датчик применялся; приблизительное время работы под давлением; меры по ликвидации неисправности и что было сделано с датчиком (например, был возвращен поставщику для анализа). Данная информация должна быть представлена для датчиков моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154, которые, как считается, проявили признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, или в отношении которых подтверждено, что из них произошла утечка масляного наполнителя. В число этих датчиков должны быть включены датчики модели 1153, изготовленные после 11 июля 1989 г.
 - в) Указывает систему, в которой применяются датчики моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154 из партий изготовителя, которые были охарактеризованы фирмой Rosemount как имеющие высокий процент отказов из-за утечки масляного наполнителя, и предоставляет график для замены тех из этих датчиков, которые применяются в системах защиты реактора или системах приводов, связанных с обеспечением безопасности.
2. Следует рассмотреть вопрос необходимости представления отчетности в соответствии с существующими предписаниями NRC на датчики моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154, которые после предоставления ответа, требуемого в п. 1 выше, проявляют признаки утечки масляного наполнителя, или в отношении которых подтверждено, что из них произошла утечка масляного наполнителя. Если делается вывод, что по

этим датчикам не требуется предоставление отчетности, то адресатам надо документировать, и, в соответствии с существующими на станции процедурами, сохранять информацию в объеме данных, запрашиваемых в вышеприведенном п. 1 б) для каждого датчика, который относится к указанной выше группе.

Хотя данным бюллетенем это не требуется, адресатам рекомендуют подавать отчетную информацию в объеме той, что запрашивается в п. 1 б) выше, в Систему данных о надежности АЭС (систему NPRDS) для всех датчиков Rosemount моделей 1151, 1152, 1153 и 1154, которые проявляют признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, или в отношении которых подтверждено, что из них произошла утечка масляного наполнителя.

Держатели разрешений на строительство

1. Все держатели разрешений на строительство, которые ожидают, что получают лицензию на эксплуатацию в срок не позднее, чем 120 дней после получения данного бюллетеня, должны не позднее 120 дней после его получения предоставить ответ, который:
 - а) подтверждает, что выполнение пунктов 1, 2, 3, 4 и 5 действий, требуемых для работающих реакторов, завершено;
 - б) указывает систему, в которой применяются датчики моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154 из партий изготовителя, которые были охарактеризованы фирмой Rosemount как имеющие высокий процент отказов из-за утечки масляного наполнителя, и предоставляет график для замены тех из этих датчиков, которые применяются в системах защиты реактора или системах приводов, связанных с обеспечением безопасности.
2. Все держатели разрешений на строительство, которые не ожидают получения лицензии на эксплуатацию в течение 120 дней после получения этого бюллетеня, должны перед датой, запланированной для загрузки топлива, предоставить ответ, подтверждающий, что выполнение п. 2 действий, требуемых для держателей разрешений на строительство, завершено.
3. Следует рассмотреть на предмет необходимости представления отчетности в соответствии с существующими предписаниями NRC на датчики моделей 1153 серии В, 1153 серии D или 1154, которые после предоставления ответа, требуемого в пунктах 1 или 2 выше, проявляют признаки утечки масляного наполнителя, или в отношении которых подтверждено, что из них про-

изошла утечка масляного наполнителя. Если делается вывод, что по этим датчикам не требуется предоставление отчетности, то адресатам надо документировать и, в соответствии с существующими на станции процедурами, сохранять информацию в объеме данных, запрашиваемых в п. 1 б) вышеприведенных требований отчетности для работающих реакторов для каждого датчика, который относится к указанной выше группе.

Хотя данным бюллетенем это не требуется, адресатам рекомендуют подавать отчетную информацию в объеме той, что запрашивается в п. 1б) вышеприведенных требований отчетности для работающих реакторов, в систему NPRDS для всех датчиков Rosemount моделей 1151, 1152, 1153 и 1154, которые проявляют признаки, указывающие на утечку масляного наполнителя, или в отношении которых подтверждено, что из них произошла утечка масляного наполнителя.

Как было указано ранее, персонал NRC считает, что методология, применяемая фирмой Rosemount для поддержки предложенных ею критериев, учитывающих соотношение между давлением и сроком службы, для нахождения датчиков, которые должны подпадать под усиленную программу надзорного наблюдения, не дает требующейся высокой степени уверенности в том, что такой вид отказов не будет иметь место. Дополнительные эксплуатационные данные, например, такие, которые должны предоставляться в ответ на данный бюллетень, могли бы использоваться промышленностью либо для обеспечения лучшего понимания целесообразности критериев фирмы Rosemount, учитывающих зависимость между давлением и сроком службы, либо для разработки основ для рассмотрения персоналом поправки к действиям, требуемым этим бюллетенем, или приостановления этих действий. В соответствии с этим, персонал NRC призывает эксплуатирующие организации проводить совместную работу под руководством технической промышленной организации по созданию базы данных по опыту работы, покрывающей все модели датчиков Rosemount.

Письменные отчеты, требующиеся выше, следует адресовать Комиссии по ядерному регулированию США для Службы контроля документов, Вашингтон, D.C. 20555; отчеты должны быть представлены под присягой или с подтверждением в соответствии с положениями раздела 182a Закона об атомной энергии от 1954 г. с последующими поправками и документа 10 CFR 50.54(f). В дополнение к этому, копию необходимо направлять соответствующему Региональному администратору.

Обсуждение внесения модификаций

Целью действий, требуемых в данном бюллетене, является обеспечение того, что отказы датчиков из-за утечки масляного наполнителя будут незамедлительно обнаружены. Утечка масляного наполнителя может привести к тому, что датчик не будет выполнять возложенную на него функцию обеспечения безопасности.

Мероприятия, требуемые этим бюллетенем, представляют новую позицию персонала NRC и поэтому данное требование рассматривается как внесение модификации в соответствии с процедурами NRC. Так как установленные регулирующие требования существуют, но не были выполнены, эта модификация заключается в том, чтобы привести положение на станциях в соответствие с существующими требованиями. Поэтому полный анализ модификации не производился. Оценка типа, предусмотренного в документе 10 CFR 50.109(a)(6), была выполнена, включая заявление о целях и причинах мероприятий, которые требуются, и основу для применения исключения из соответствия требованиям. Эта оценка будет доступна для ознакомления в Публичной библиотеке Комиссии по ядерному регулированию вместе с протоколом 179-го заседания Комитета по рассмотрению общих требований.

Данное требование согласовано с Административно-бюджетным управлением (регистрационный номер 3150-0011, действующий до 31 января 1991 г). Оценка трудозатрат составляет 6 человеко-часов на один датчик и одного держателя лицензии. Сюда включена оценка требующихся мероприятий, сбор и рассмотрение документации станции, анализ данных, полученных из документов, и составление требуемого ответа. В оценку не включены разработка и осуществление требуемой усиленной программы надзорного наблюдения или замена датчиков из партий изготовителя, которые были охарактеризованы фирмой Rosemount как имеющие высокий процент отказов из-за утечки масляного наполнителя и которые применяются в системах защиты реактора или системах приводов, связанных с инженерными системами обеспечения безопасности. Комментарии на оценку этих трудозатрат или по любому другому вопросу данного свода информации, включая предложения по снижению этих трудозатрат, следует посылать в Подразделение информации и управления документацией Отдела услуг по информационной поддержке, Бюро управления информационными ресурсами, Комиссии по ядерному регулированию США, Вашингтон, D.C. 20555, а также в адрес Проекта по снижению канцелярской работы

(3150-0011), Административно-бюджетного управления, Вашингтон, D.C. 20503.

Если у вас имеются какие-либо вопросы по рассматриваемому предмету, пожалуйста свяжитесь с одним из указанных ниже технических специалистов или с соответствующим управляющим проекта NRR.

Чарльз И. Росси, Директор
Отдел оценки эксплуатационных происшествий
Бюро регулирования ядерных реакторов

Технические специалисты: Джек Рэмси, NRR, (301) 492-1167

Винс Томас, NRR, (301) 492-0786

Список литературы

1. Технический бюллетень фирмы Rosemount №1 от 10 мая 1989 г.
2. Технический бюллетень фирмы Rosemount №2 от 12 июля 1989 г.
3. Технический бюллетень фирмы Rosemount №3 от 23 октября 1989 г.
4. Технический бюллетень фирмы Rosemount №4 от 22 декабря 1989 г.

Приложения:

1. Типичные физические характеристики датчика Rosemount
2. Перечень недавно выпущенных информационных сообщений NRC 1

Август 2004 г.

ВЫПУСК 176: «ПОТЕРЯ МАСЛЯНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В ДАТЧИКАХ ROSEMOUNT»

Описание

Историческая справка

Группа по рассмотрению датчиков Rosemount (Rosemount Transmitter Review Group, или RTRG) была учреждена [1659]¹ с целью оценки работ, предпринятых для изучения проблем с утечкой масла из датчиков Rosemount. Эта оценка включала определение достаточности информации и действий, указанных в бюллетене NRC 90-01 [1658], Дополнение 1, которым держатели лицензий были уведомлены о действиях, предпринятых NRC и промышленностью для оценки и рассмотрения утечки масляного наполнителя из датчиков Rosemount, изготовленных до 11 июля 1989 г., и которым потребовали, чтобы держатели лицензий приняли меры по разрешению данных проблем.

Персоналом NRC был разработан план работ, в который были включены следующие рекомендации группы RTRG, направленные на решение проблем с утечкой масляного наполнителя из датчиков Rosemount: (1) провести временные инструкционные (ВИ) инспекции для проверки обязательств, взятых на себя держателями лицензий с целью выполнения действий, требуемых в бюллетене NRC 90-01 [1658], Дополнение 1, и для сбора данных об отказе датчиков Rosemount на конкретной станции; (2) установить диалог с фирмой Rosemount, Inc. в отношении информации об отказах датчиков Rosemount; (3) рассмотреть информацию из базы данных NPRDS относительно работы датчиков Rosemount; (4) рассмотреть отчет EPRI №TR-102908 «Рассмотрение технических вопросов, связанных с отказами датчиков давления Rosemount из-за утечки масляного наполнителя», выпущенный в августе 1994 г. Этот вопрос был предметом меморандума NRR [1601], адресованного RES в феврале 1996 г.

¹ Далее ссылки в тексте соответствуют списку литературы в оригинальном документе NRC, в книге этот список не приводится.

Значимость с точки зрения безопасности

Утечка масляного наполнителя из датчиков Rosemount была классифицирована как, возможно, не поддающаяся обнаружению причина отказа общего вида. Такие отказы могли бы привести к потере автоматической защиты реактора и приводов, связанных с инженерными системами обеспечения безопасности.

Возможное решение проблемы

Персонал NRC определил, что держатели лицензий должны предпринять действия с целью обеспечить выполнение функций, связанных с безопасностью. Эти действия были определены в бюллетене 90-01 [1658] и позднее изменены в бюллетене 90-01 [1658, Дополнение 1. Временные рамки для этого плана действий были основаны на том факте, что держатели лицензий выполнили действия, требуемые в бюллетене 90-01 [1658], Дополнение 1, и этот план был задуман только как подтверждение достаточности действий, которые требовались в бюллетене [1658].

Деятельность, указанная в плане действий, была завершена в качестве контроля исполнения и проверки осуществления мер, требуемых бюллетенем 90-01 [1658], Дополнение 1. Держатели лицензий решили проблемы с отказами общего рода либо путем замены соответствующих датчиков датчиками новой конструкции, у которых проблема утечки масла была решена, либо подвергая затрагиваемые данной проблемой датчики усиленной программе надзорного наблюдения с целью убедиться в их надлежащем функционировании. Был установлен двухлетний период для завершения необходимых действий по проверке, рекомендованных группой RTRG, включая ВИ инспекции и рассмотрение работы датчиков Rosemount, наблюдаемой в последнее время.

Заключение

Временная инструкция 2515/122 «Оценка работы датчиков давления Rosemount и программы надзорного наблюдения держателями лицензий» была выпущена 17 марта 1994 г., а инспекции начались в мае 1994 г. Основываясь на результатах выполнения Временной инструкции, персонал NRC определил, что держатели лицензий эффективно решали проблему утечки масляного наполнителя из датчиков Rosemount, в общем, путем выполнения действий, требуемых в бюллетене 90-01 [1658], Дополнение 1, и рекомендаций производителя, основанных на изучении тенденций дрейфа датчиков.

Персонал NRC проводил периодические встречи (между январем 1994 и сентябрем 1995 г.) с сотрудниками фирмы Rosemount, Inc. для обмена информацией о работе датчиков. В дополнение к этому, персонал завершил рассмотрение данных из базы данных NPRDS, относящихся к отказам датчиков Rosemount в течение того же периода времени. Основываясь на информации, представленной фирмой Rosemount, Inc., и результатах рассмотрения данных NPRDS, персонал NRC сделал вывод о том, что наблюдалось значительное уменьшение числа отказов, вызванных утечкой масляного наполнителя, со времени выпуска бюллетеня 90-01 [1658], Дополнение 1.

15 февраля 1995 г. персонал NRC завершил рассмотрение отчета EPRI TR-102908 и подтвердил, что он по существу подтверждает предыдущие выводы, рекомендации и требуемые действия, указанные в бюллетене 90-01 [1658], Дополнение 1.

Основываясь на результатах выполнения вышеуказанных действий, персонал NRC подтвердил, что вся относящаяся к делу информация по вопросу об утечках масляного наполнителя в датчиках Rosemount сохранилась в бюллетене 90-01 [1658], Дополнение 1 и в технических рекомендациях фирмы Rosemount. Поэтому персонал NRC заключил, что проблема обеспечения безопасности в связи с этим вопросом была практически решена предпринятыми действиями и что отсутствует необходимость в каких-либо изменениях или дополнительных мерах. Таким образом, этот вопрос был **УСПЕШНО РЕШЕН** и никаких новых требований не было выпущено.

Научное издание

Хашемиан Х. М.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**

Зав. редакцией канд. биол. наук Е.В. Мосткова

Оформление: С.О. Мясникова

Компьютерная верстка: Б.Ю. Руссо

Подписано в печать 25.10.2011

Формат 70х100/16, Печ. л. 22

Бумага офсетная №1. Тираж 1000 экз. Заказ 9308

ООО Издательство БИНОМ

103473 Москва, ул. Краснопролетарская, 16

info@binom-press.ru

При участии ООО Агентство печати «Столица»

тел.: (495) 331-14-38; e-mail: apstolica@bk.ru

Отпечатано с готовых файлов заказчика
в ОАО «Первая Образцовая типография»,
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14



БИНОМ

**Издательство БИНОМ представляет
книги для интересующихся тематикой
АЭС**

Василенко И.Я., Василенко О.И.

Биологическое действие продуктов ядерного деления

В монографии представлены обобщенные материалы уникальных многолетних исследований биологического действия продуктов ядерного деления.

Для радиобиологов, медиков, радиотоксикологов, радиогигиенистов, физиков, специалистов по радиационной безопасности и др.

Хашемиан.Х.М.

Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности.

Монография посвящена промышленным датчикам технологических процессов, современным методам измерения их характеристик, типичным проблемам, которые возникают при эксплуатации измерительной аппаратуры, методам ее диагностики и повышения надежности.

Для широкого круга инженерно-технических работников, связанных с управлением технологическими процессами, студентов и аспирантов технических вузов.