

В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК АЭС**

**Воронеж
Издательство «Научная книга»
2017**

УДК 681.518

Рецензенты:

Каляев И.А. - академик РАН, д-р техн. наук, проф.;
Скрыпников А.В. - д-р техн. наук, проф.

П 42 Поваров, В.П. Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок АЭС / В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов. - Воронеж: Издательство «Научная книга», 2017. - 244 с.

ISBN 978-5-98222-944-1

В монографии содержится материал, являющийся обобщением результатов теоретических и практических исследований вопросов разработки математического, алгоритмического и программно-технического обеспечения методологии непрерывного многопараметрического мониторинга параметров состояния критических элементов АЭС, подверженных эксплуатационным повреждениям при температурных напряженно-деформирующих воздействиях, не предусмотренных на стадиях разработки проекта ядерного блока.

Работа представляет практический интерес для научных работников и специалистов занимающихся проблемами разработки систем принятия решений, разработки систем диагностики и контроля, проектирования ядерных энергетических установок, а также аспирантам и студентам, проходящим подготовку по направлениям, связанным с применением автоматизированных информационных систем в ядерной энергетике.

Табл. 9. Ил. 106. Библиогр.: 85 назв.

ISBN 978-5-98222-944-1

© Поваров В.П., Бакиров М.Б.,
Данилов А.Д., 2017

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие информационных технологий расширяет область их применения и повышает уровень интеллектуализации управления различными процессами во всех сферах деятельности человека. Одной из серьезнейших проблем, требующих применения экспертных систем, являются задачи обработки и анализа информации для принятия решений при управлении потенциально опасными объектами ядерной энергетики. К таким объектам относятся и атомные электростанции (АЭС), характерной особенностью управления которых является то, что любой энергоблок представляет собой динамический объект с большой вероятностью появления в процессе эксплуатации внештатных ситуаций не предусмотренных на этапах проектирования. Продление срока службы ядерных блоков поставило вопрос об организации эксплуатационного непрерывного контроля за прочностными характеристиками оборудования энергетических установок на соответствие регламентированным нормам согласно ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы включают данные по физико-механическим свойствам конструкционных материалов деталей и конструкций, расчет на статическую, длительную циклическую, вибрационную прочность, данные по пластичности, ползучести и сейсмичности, а также ограничения по необратимым изменениям физико-механических свойств материалов в эксплуатационных условиях. Такая экспертная расчетно-экспериментальная работа должна строиться на глубокой оценке фактического состояния оборудования с использованием самых передовых методических подходов и информационных средств технической диагностики и контроля.

Главной проблемой решения такой задачи является то, что типовым проектом АЭС не были предусмотрены системы неразрушающего контроля дефектности и диагностики фактической термосиловой нагруженности наиболее проблемного оборудования. В процессе эксплуатации АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) были выявлены некомпенсированные повреждения в виде трещин, вплоть до сквозных, узла приварки горячего коллектора теплоносителя первого контура к патрубку Ду 1200 парогенераторов. Начиная с 1980 года, на АЭС с PWR и ВВЭР обнаружены десятки эксплуатационных дефектов и даже сквозных трещин на трубопроводах системы компенсации давления, причиной образования которых признано явление стратифи-

кации. В дальнейшем были обнаружены однотипные повреждения еще на нескольких парогенераторах (ПГ), что заставило рассматривать случаи повреждения как системную проблему, имеющую общие причины.

Таким образом, была поставлена задача разработки и внедрения нового подхода в расчетно-экспериментальной оценке повреждаемости наиболее эксплуатационно-нагруженных зон ответственного оборудования АЭС. Исследования, основывающиеся на разработке методологии непрерывного многопараметрического расчетно-экспериментального мониторинга повреждаемости критических элементов в процессе эксплуатации, приведенные в данной работе, и посвящены решению этой проблемы.

Для достижения поставленной цели авторами были сформулированы следующие задачи:

- провести анализ проблематики принятия решений в системах контроля, диагностики и управления потенциально-опасными объектами ядерной энергетики;

- провести анализ существующих методов контроля, диагностики и управления потенциально-опасными элементами современных АЭС;

- провести с позиций системной методологии анализ эксплуатационной повреждаемости элементов потенциально-опасного объекта;

- провести анализ физических особенностей повреждаемости критических элементов ядерного блока и разработать модель численного расчета параметров механического разрушения для пространственных трещин;

- разработать систему многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования атомной электростанции;

- разработать алгоритм реализации процесса многопараметрического расчетно-экспериментального мониторинга;

- разработать модели и алгоритмы идентификации потенциально-опасных процессов в критических элементах ядерного блока;

- осуществить практическую апробацию системы многопараметрического мониторинга и принятия решений в реальных условиях эксплуатации потенциально опасных объектов ядерной энергетики.

В качестве теоретической и методологической основы данно-

го научного исследования использованы элементы системного анализа, математической физики, численных методов, систем управления базами знаний и средств структурно-объектного моделирования.

В *первой главе* представлен анализ проблематики принятия решений в системах контроля, диагностики и управления потенциально-опасными объектами ядерной энергетики. Проведен сравнительный анализ моделей представления знаний в системах принятия решений. Проведен критический анализ СПРИНТ-технологии построения систем принятия решений реального времени и существующих методов контроля, диагностики и управления потенциально-опасными установками современных АЭС.

Во *второй главе* с позиций системного подхода проведен анализ эксплуатационной повреждаемости элементов ядерного блока. Предложена новая методология многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования атомной электростанции. Разработаны модели и алгоритмы идентификации потенциально-опасных процессов в критических элементах.

В *третьей главе* рассмотрены вопросы, касающиеся практической реализации предлагаемого программно-аппаратного комплекса многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов АЭС. Приведен пример расчетно-экспериментального анализа нагруженности зоны сварного соединения № 111-1 парогенератора 5ПГ-4. Предложены варианты практической реализации предлагаемого комплекса для различных видов диагностики: ультразвукового мониторинга, акустико-эмиссионного мониторинга, мониторинга стратификации дыхательного трубопровода компенсатора давления, мониторинга защитной оболочки (контаймента).

Работа представляет практический интерес для научных работников и специалистов занимающихся проблемами разработки систем принятия решений, разработки систем диагностики и контроля, проектирования ядерных энергетических установок, а также аспирантам и студентам, проходящим подготовку по направлениям, связанным с применением автоматизированных информационных систем в ядерной энергетике.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Анализ проблематики принятия решений в системах контроля, диагностики и управления потенциально опасными объектами ядерной энергетики	6
1.1. Модели представления знаний в системах принятия решений при управлении потенциально опасными объектами ядерной энергетики	6
1.1.1. Формализация процесса приобретения знаний в системах принятия решений при управлении потенциально опасными объектами.....	6
1.1.2. Способы описания знаний в системах принятия решений	7
1.1.3. Логическая модель представления знаний в системах принятия решений.....	10
1.1.4. Модели представления знаний, основанные на аппарате семантических сетей.....	14
1.1.5. Продукционные модели	19
1.2. Анализ СПРИНТ-технологии построения систем принятия решений реального времени в задачах управления процессами ядерной энергетики	25
1.2.1. Концептуальная модель СПРИНТ-технологии.....	26
1.2.2. Организация базы знаний для системы принятия решений	29
1.2.3. Функциональная структура системы поддержки оператора в СПРИНТ-технологии реального времени.....	32
1.2.4. Алгоритмы процессов поддержки операторов ядерного блока	34
1.3. Анализ существующих методов контроля, диагностики и управления потенциально опасными элементами современных АЭС	56
1.3.1. Концепция построения сети диагностических систем с использованием СКД.....	57
1.3.2. Контроль акустического шума и влажности (контроль течей)	61
1.3.3. Контроль флуктуаций сигналов РУ (СКВ).....	66

1.3.4. Контроль свободных предметов (СОСП)	72
1.3.5. Контроль состояния электроприводной арматуры (КСДА)	76
1.3.6. Контроль вибрационного состояния оборудования (АСВД, СТД ГЦНА и др.)	79
1.3.7. Контроль выработки ресурса оборудования (САКОР) ...	83

Глава 2. Система многопараметрического мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов объектов ядерной энергетики 88

2.1. Системный подход к анализу эксплуатационной повреждаемости элементов потенциально-опасного объекта на примере ядерного блока	88
2.1.1. Основные постулаты к анализу эксплуатационной повреждаемости критических элементов ядерных энергетических установок	88
2.1.2. Иерархическая структура ядерного блока АЭС	90

2.2. Характеристика физических особенностей повреждаемости критических элементов ядерного блока	94
2.2.1. Характеристика физических особенностей эксплуатационной повреждаемости критических элементов	94
2.2.2. Модель численного расчета параметров механического разрушения для пространственных трещин в критических элементах ЯЭУ	100

2.3. Характеристика системы многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования атомной электростанции	103
2.3.1. Структура системы многопараметрического непрерывного мониторинга	103
2.3.2. Алгоритм реализации процесса многопараметрического расчетно-экспериментального мониторинга	109
2.3.3. Анализ остаточного ресурса оборудования на основе концепции непрерывного многопараметрического мониторинга	110
2.3.4. Концепция безопасной эксплуатации объектов ядерной энергетики на основе методологии непрерывного многопараметрического мониторинга	115

2.4. Модели и алгоритмы идентификации потенциально-опасных процессов в критических элементах ядерного блока ..	117
2.4.1. Конечно-элементное моделирование.....	117
2.4.2. Модели нестационарных процессов в критических элементах.....	121
2.4.3. Моделирование нелинейного трехмерного напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов	125
2.4.4. Моделирование напряженно-деформированного состояния критических элементов методом суперэлементов.....	129
2.4.5. Алгоритм численной реализации расчетов напряженно-деформированного состояния комбинированным методом	136

Глава 3. Результаты практической апробации системы многопараметрического мониторинга в реальных условиях эксплуатации потенциально опасных объектов ядерной энергетики	140
---	------------

3.1. Контроль фактической эксплуатационной нагруженности зоны СС №111-1 5ПГ-4.....	140
3.1.1. Состав системы контроля термо-деформационной нагруженности	141
3.1.2. Анализ результатов контроля термо-деформационной нагруженности.....	145
3.1.3. Анализ результатов контроля перемещений элементов ПГ-ГЦТ	152

3.2. Расчетно-экспериментальный анализ нагруженности зоны СС № 111-1 5ПГ-4.....	154
3.2.1. Расчетные режимы и параметры нагружения	154
3.2.2. Разработка конечноэлементной модели циркуляционной петли № 4 энергоблока № 5 НВАЭС.....	155
3.2.3. Оценка влияния вклада основных параметров нагружения в напряженно-деформированное состояние СС № 111-1	159

3.3. Ультразвуковой мониторинг эксплуатационной повреждаемости зоны СС №111-1 5ПГ-4	166
3.3.1. Система ультразвукового мониторинга СС №111-1	167
3.3.2. Обработка данных в системе ультразвукового мониторинга	171

3.4. Акустико-эмиссионный мониторинг зоны СС №111-1 приварки «горячего» коллектора к патрубку ПГ-4 энергоблока №5 НВАЭС	176
3.4.1 Задачи метода контроля акустической эмиссии при мониторинге зоны СС №111	176
3.4.2. Анализ АЭ картины в зоне СС №111-1 5ПГ-4 в период проведения пуско-наладочных операций и выхода энергоблока на мощность	179
3.4.3. Анализ АЭ мониторинга зоны СС №111-1 приварки «горячего» коллектора к патрубку ПГ-4 энергоблока №5 НВАЭС в период работы на мощности и останова РУ	184
3.5. Система мониторинга стратификации дыхательного трубопровода компенсатора давления	187
3.6. Мониторинг защитной оболочки (контаймента)	193
Заключение	202
Приложение 1.....	203
Приложение 2.....	217
Библиографический список	232

Научное издание

Поваров Владимир Петрович
Бакиров Мурат Баязитович
Данилов Александр Дмитриевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК АЭС**

Монография

Издание публикуется в авторской редакции

Дизайн обложки С.А. Кравец, Н. Чурикова

Подписано в печать 30.11.2017. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 17,1. Заказ 000. Тираж 500 экз.

ООО Издательство «Научная книга»
394077, Россия, г. Воронеж, ул. 60-й Армии, 25-120
<http://www.sbook.ru/>

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО «Цифровая полиграфия»
394036, Россия, г. Воронеж, ул. Ф. Энгельса, 52
Тел. (473) 261-03-61