

Г.В. АРКАДОВ В.И. ПАВЕЛКО Б.М. ФИНКЕЛЬ

# СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВВЭР



МОСКВА НАУКА 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	4
Список принятых сокращений .....	7
<b>Глава 1</b>	
Глобальный и локальные подходы к диагностированию реакторной установки .....	11
<b>Глава 2</b>	
Историческая справка .....	16
<b>Глава 3</b>	
Режимы функционирования СКД .....	22
<b>Глава 4</b>	
Критика стереотипов .....	39
<b>Глава 5</b>	
Системы диагностирования с высокой степенью формализации диагностического процесса .....	43
<b>Глава 6</b>	
Системы верхнего уровня, интегрирующие ЛСД .....	53
<b>Глава 7</b>	
Функции реального времени в СКД .....	61
7.1. Система режимной диагностики для реализации функций реального времени СКД .....	61
7.2. Сравнение логической модели с другими моделями диагностирования РУ ...	66
7.3. Идеализированная модель непрерывного всережимного диагностирования РУ ..	73
<b>Глава 8</b>	
Функции отсроченного анализа в СКД .....	79
8.1. Отсроченный анализ в ЛСД .....	79
8.2. Сценарии как способ реализации функции отсроченного диагностирования системой комплексного диагностирования .....	80
<b>Глава 9</b>	
Структура СКД для отсроченного диагностирования .....	87
<b>Глава 10</b>	
Улучшение качества диагностирования с помощью СКД .....	90
<b>Глава 11</b>	
Формальные методы диагностирования и системы, их реализующие .....	97
11.1. Простые виртуальные системы диагностирования в среде СКД .....	97
11.2. Виртуальные системы, построенные на штатных сигналах .....	102
11.3. Формальные методы на предварительном этапе диагностирования .....	103

<b>Глава 12</b>	
<b>Системы комплексного диагностирования и контроля остаточного циклического ресурса.....</b>	<b>106</b>
<b>Глава 13</b>	
<b>Комбинирование измерительной информации различных систем.....</b>	<b>111</b>
13.1. Построение групп диагностических признаков по типу оборудования и пространственной симметрии измерений .....	111
13.2. Диагностические признаки, извлекаемые из штатных сигналов, метод ВКФ-анализа.....	115
13.3. Подготовка вектора диагностических признаков .....	118
<b>Глава 14</b>	
<b>Диагностирование измерительных каналов АСУ ТП детерминированными методами в среде СКД.....</b>	<b>121</b>
14.1. Используемые взаимосвязи .....	121
14.2. Математическое описание .....	122
<b>Глава 15</b>	
<b>Многомерный статистический анализ стандартными средствами как элемент отсроченного анализа в СКД.....</b>	<b>131</b>
15.1. Классы задач .....	131
15.2. Пример применения факторного анализа .....	133
15.3. Пример применения математического аппарата теории надежности к технической диагностике .....	135
<b>Глава 16</b>	
<b>Контроль тепловых перемещений средствами СВШД.....</b>	<b>138</b>
16.1. Направления измерений перемещений .....	138
16.2. Характеристики перемещений .....	140
16.3. Взаимный корреляционный анализ .....	145
16.4. Перемещение основного оборудования петель при изменении температуры ТН, близком к периодическому. Эффект гистерезиса .....	148
16.5. Увеличение мощности РУ, начиная с МКУ, с последующим возвратом на МКУ .....	154
16.6. Выход на мощность .....	158
<b>Глава 17</b>	
<b>Метод расчета перемещений ПГ в процессе эксплуатации по контролируемым перемещениям штоков гидроамортизаторов.....</b>	<b>159</b>
17.1. Постановка задачи .....	159
17.2. Математическая модель .....	160
17.2.1. Глобальная и локальная системы координат .....	160
17.2.2. Элементарные преобразования .....	161
17.3. Алгоритм .....	163
17.4. Пример расчета .....	166
<b>Глава 18</b>	
<b>Графические средства отображения как сервис для отсроченного анализа .....</b>	<b>170</b>
18.1. Отображение информации по контролю тепловых перемещений .....	170
18.2. Отображение при анализе архивов СОСП и СВШД.....	172
<b>Глава 19</b>	
<b>Интерпретация вибрационных измерений, полученных разными ЛСД, в среде СКД.....</b>	<b>178</b>

19.1. Простейшая модель для интерпретации собственных характеристик колебаний конструкций .....	178
19.2. Методы оценивания логарифмического декремента колебаний .....	181
19.3. Особенности спектрального оценивания .....	184
19.4. Спектральные инварианты .....	187
19.5. Вычисление виброперемещений по сигналам виброускорений .....	188
<b>Глава 20</b>	
<b>Дополнительные возможности СОСП и реализация их в среде СКД .....</b>	<b>194</b>
<b>Глава 21</b>	
<b>Примеры диагностических событий .....</b>	<b>198</b>
21.1. ВВЭР-440 .....	198
21.1.1. Локальные системы диагностирования ВВЭР-440 .....	198
21.1.2. Кольская АЭС .....	198
21.1.3. Нововоронежская АЭС .....	201
21.1.4. АЭС «Пакш» .....	207
21.1.5. АЭС «Богуннице» .....	208
21.2. ВВЭР-1000 .....	211
21.2.1. Виброперемещения как фактор нагружения сварных швов коллекторов ПГ .....	211
21.2.2. Колебания ПГ, ГЦН и корпуса реактора, возбуждаемые АСВ теплоносителя .....	216
21.2.3. АЭС «Тяньвань» .....	222
<b>Глава 22</b>	
<b>Источники нейтронного шума в реакторах ВВЭР .....</b>	<b>226</b>
22.1. Экспериментальные исследования источников нейтронного шума ВВЭР-1000 .....	226
22.2. Влияние концентрации борной кислоты на СКЗ нейтронного шума .....	227
22.3. Нормированные флуктуации тока ИК при наличии нескольких источников нейтронного шума .....	229
22.4. Нейтронно-шумовая динамика ВВЭР-440 .....	232
22.5. Сравнительный анализ вибронгруженности внутрикорпусных устройств и рабочих кассет РУ ВВЭР-440 проектов В-179, В-230, В-213 .....	237
22.5.1. Расход теплоносителя через ГЦК как важнейший фактор вибронгруженности .....	237
22.5.2. Теплогидравлические и вибрационные источники внутризонного нейтронного шума .....	240
<b>Глава 23</b>	
<b>Электротехнические аналогии элементов контуров ГЦК .....</b>	<b>244</b>
23.1. Эквивалентная схема ГЦК ВВЭР .....	244
23.2. Простой пример применения электротехнической аналогии .....	246
23.3. Изменение гидравлических сопротивлений ПГ и ГЦН .....	247
23.4. Электротехническая аналогия для оценивания перепада давления на активной зоне ВВЭР-440 .....	251
23.4.1. Влияние примесей ТН на перепад давления на активной зоне .....	251
23.4.2. Эквивалентная феноменологическая схема активной зоны ВВЭР-440 .....	251
23.4.3. Практические результаты .....	253
23.4.4. Увеличение диаметра дроссельных шайб .....	256

## Глава 24

<b>Математический аппарат теории динамической системы</b> .....	259
24.1. Фундаментальные принципы, из которых выводится уравнение движения ДС. Принцип Даламбера. Уравнение динамики Даламбера—Эйлера. Принцип Гамильтона .....	259
24.2. Принцип Гамильтона для диссипативной ДС .....	264
24.3. Энергетические свойства ДС .....	268
24.3.1. Энергия собственных колебаний ГО .....	268
24.3.2. ГО под действием синусоидальной внешней силы .....	270
24.3.3. Внешняя сила и начальные условия .....	276
24.3.3.1. Начальные условия для ГО без воздействия внешней силы .....	276
24.3.4. Общий случай .....	281
24.3.5. Диссипативная ДС под действием синусоидальной силы .....	284
24.4. Комплексная энергетическая подстановка .....	288
24.5. Пространство Рунге .....	295
24.5.1. Определение и свойства пространства Рунге .....	295
24.5.2. Парабола Рунге и передаточная функция ДС .....	298
24.5.3. Параметры пространства Рунге и рабочая полоса частот измерительного канала .....	305
24.6. Комплексное обобщение инерционности, жесткости и диссипации .....	308
24.7. Спектры сил в пространстве Рунге .....	312
24.8. Фазовое пространство «сила—перемещение» .....	321
24.9. Особые точки наклонного эллипса .....	323
24.9.1. Фазовое пространство и пространство Рунге .....	323
24.9.2. Безразмерный нормированный наклонный эллипс .....	329
24.10. ДС, как система с обратной связью .....	334
24.10.1. Комплексное перемещение .....	334
24.10.2. Передаточные функции ДС .....	347
24.10.3. Практические соображения по измерениям параметров ДС (М, С, К) .....	350
24.10.4. Распространенные ошибки интерпретирования спектральных свойств ДС .....	355

## Приложение 1

<b>Методология самозащищенной системы режимной диагностики</b> .....	358
П1.1. Система режимной диагностики как программная оболочка .....	358
П1.2. Основные понятия самозащищенной СРД и практические примеры, иллюстрирующие их .....	358
П1.3. Методы, обеспечивающие заданное качество диагностирования при деградации детекторного оснащения .....	382
П1.3.1. Самозащищенность от «нечетких» знаний. Достижение многовариантности диагноза при априорной неопределенности .....	382
П1.3.2. Самозащищенность при отказах детекторов. Уменьшение числа шагов для достижения диагноза .....	384
П1.4. Практические рекомендации по разработке СРД .....	386
П1.5. Сравнение с другими логическими моделями .....	389

## Приложение 2

<b>Основные термины и определения в нормативных документах</b> .....	392
--	-----