

БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ



М. А. Ястребеницкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская, Г. Джонсон,
В. В. Елисеев, А. А. Сиора, В. В. Скляр, Л. И. Спектор, В. С. Харченко

БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Под редакцией
доктора технических наук
М. А. Ястребенецкого

УДК 621.039.58:004.9

Серия основана в 2004 г.

Рекомендовано к печати научно-техническим советом Государственного научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности, протокол N 11-3 от 10.04.2011 г.

Рецензенты:

А. А. Ключников, академик Национальной академии наук Украины, директор Института проблем безопасности АЭС НАН Украины; *А. Х. Горелик*, доктор техн. наук, профессор, директор Харьковского института комплексной автоматизации

Ястребенецкий М. А.

Системы управления и защиты ядерных реакторов / М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская, Г. Джонсон, В. В. Елисеев, А. А. Сиора, В. В. Скляр, Л. И. Спектор, В. С. Харченко; Под ред. М. А. Ястребенецкого. — К.: Основа-Принт, 2011. — 768 с. — (Безопасность атомных станций).

ISBN 966-02-4149-6 (серия)

ISBN 798-966-2044-52-2

Монография посвящена системам управления и защиты (СУЗ) ядерных реакторов. Рассмотрены относящиеся к СУЗ нормативные базы Украины, Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), Международной электротехнической комиссии (МЭК); приведены требования к СУЗ. Описаны системы, входящие в состав СУЗ: контроля нейтронного потока, аварийной и предупредительной защиты, автоматического регулирования и ограничения мощности, группового и индивидуального управления органами регулирования. Основное внимание уделено новым системам, разработанным предприятиями Украины.

Для разработчиков и проектировщиков информационных и управляющих систем АЭС, работников АЭС, связанных с эксплуатацией этих систем и обеспечением безопасности АЭС, сотрудников органов государственного регулирования ядерной и радиационной безопасности, а также для научных работников и студентов технических университетов. Книга может быть полезна для специалистов по созданию и эксплуатации информационных и управляющих систем в иных отраслях техники, критических с точки зрения безопасности: авиации, железнодорожном и морском транспорте, химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, добычи и транзита нефти и газа и др.

ISBN 966-02-41-49 (серия)

ISBN 798-966-2044-52-2

© Коллектив авторов, 2011

Оглавление

Предисловие.....	10
Глава 1. ЭНЕРГОБЛОКИ С РЕАКТОРАМИ ВВЭР (<i>М. А. Ястребенецкий</i>).....	13
1.1. К истории развития реакторов ВВЭР.....	13
1.2. Общие сведения о технологических системах.....	19
1.3. Основные задачи управления энергоблоком.....	25
Список использованной литературы к главе 1.....	30
Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	31
2. Информационные и управляющие системы (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	31
2.1.1. Функции.....	31
2.1.2. Виды систем.....	33
2.1.3. Проектирование.....	35
2.2. Программно-технические комплексы (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	39
2.2.1. Отличительные особенности.....	40
2.2.2. Разработка и изготовление головного образца.....	42
2.2.3. Изготовление поставочных комплектов.....	45
2.3. Технические средства автоматизации (<i>Ю. В. Розен</i>).....	46
2.3.1. Отличительные особенности.....	47
2.3.2. Разработка и изготовление единичных изделий.....	48
2.3.3. Разработка и поставка тиражируемых изделий.....	49
2.3.4. Квалификация.....	50
2 - Программное обеспечение (<i>Ю. В. Розен, В. С. Харченко</i>).....	52
2.4.1. Программное обеспечение централизованных систем.....	53
2.4.2. Программное обеспечение распределённых систем.....	55
2.4.3. Электронные проекты сложных программируемых компонентов.....	57
2.4.4. Гарантоспособность программного обеспечения.....	61
2.4.5. Модификации программного обеспечения.....	64
2.5. Агрегатные комплексы (платформы) (<i>Ю. В. Розен</i>).....	65
2.5.1. Назначение.....	65
2.5.2. Первые агрегатные комплексы.....	67
2.5.3. Современные отечественные платформы.....	71
2.5.4. Платформы зарубежных фирм.....	76
2.5.5. Использование платформы в качестве технической базы ПТК.....	81
2.6. Система управления и защиты реактора (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	84
2.6.1. Назначение и функции.....	84
2.6.2. Состав системы.....	85
2.7. Системы управления технологическими процессами (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	86
2.7.1. Определение.....	86
2.7.2. Возможность реализации.....	87

2.8. АСУ ТП типового проекта энергоблока (Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий).....	89
2.8.1. Нижний уровень.....	93
2.8.2. Верхний уровень.....	103
2.9. Модернизация АСУ ТП типового проекта энергоблока (Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий).....	106
2.9.1. Необходимость модернизации.....	106
2.9.2. Цель и организация работ.....	107
2.9.3. Основные принципы.....	109
2.9.4. Выполнение работ.....	110
2.9.5. Модернизированные АСУ ТП украинских энергоблоков.....	116
2.10. Модернизированная система управления и защиты (Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий).....	119
2.10.1. Контроль нейтронного потока.....	119
2.10.2. Аварийная и предупредительная защита.....	122
2.10.3. Автоматическое регулирование, разгрузка, ограничение мощности.....	124
2.10.4. Управления органами регулирования.....	126
Список использованной литературы к главе 2.....	128
Глава 3. НОРМАТИВНАЯ БАЗА (М. А. Ястребенецкий).....	132
3.1. Система нормативно-правового регулирования Украины в сфере использования ядерной энергии, ядерной и радиационной безопасности.....	133
3.2. Нормативная база МАГАТЭ.....	140
3.3. Стандарты Международной электротехнической комиссии, относящиеся к важным по безопасности информационным и управляющим системам.....	142
3.4. Стандарты по промышленным информационным и управляющим системам.....	145
3.5. Стандарты по критическим системам. Функциональная безопасность	147
3.6. Принципы гармонизации нормативных документов Украины с международными стандартами.....	150
Список использованной литературы к главе 3.....	151
Глава 4. КЛАССИФИКАЦИЯ ИУС И ИХ КОМПОНЕНТОВ (Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий).....	154
4.1. Принципы и критерии классификации.....	155
4.1.1. Принципы и критерии классификации, действующие в Украине.....	155
4.1.2. Принципы и критерии классификации МАГАТЭ.....	162
4.1.3. Принципы и критерии классификации МЭК.....	165
4.2. Гармонизация с международными стандартами.....	169
4.2.1. Задача гармонизации.....	169
4.2.2. Гармонизация с классификацией МАГАТЭ.....	171
4.2.3. Гармонизация с классификацией МЭК.....	172
4.3. Классификация по безопасности и требования к качеству.....	175
Список использованной литературы к главе 4.....	178

Глава 5. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИУС И ИХ КОМПОНЕНТАМ	179
5.1. Функциональные требования (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	181
5.1.1. Функциональный и системный подход.....	181
5.1.2. Функции систем нормальной эксплуатации.....	183
5.1.3. Функции систем безопасности.....	188
5.1.4. Совмещение функций.....	192
5.2. Требования к надежности выполнения функций (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	193
5.2.1. Защита от отказов по общей причине.....	193
5.2.2. Соблюдение принципа единичного отказа.....	194
5.2.3. Соблюдение принципа резервирования.....	195
5.2.4. Соблюдение принципа разнообразия.....	197
5.2.5. Требования к предотвращению ошибок персонала.....	198
5.2.6. Требования к защите от несанкционированного доступа.....	200
5.2.7. Требования к показателям надежности.....	201
5.2.8. Требования к техническому диагностированию.....	203
5.3. Требования к стойкости выполнения функций (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	204
5.3.1. Общие требования.....	204
5.3.2. Стойкость к воздействию окружающей среды.....	207
5.3.3. Стойкость к механическим воздействиям.....	211
5.3.4. Невосприимчивость к электрическим воздействиям.....	218
5.3.5. Стойкость к воздействиям специальных сред.....	219
5.3.6. Невосприимчивость к изменениям параметров электропитания.....	220
5.3.7. Невосприимчивость к электромагнитным помехам.....	221
5.4. Требования к качеству функционирования (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	223
5.4.1. Требования к точности.....	223
5.4.2. Требования к временным характеристикам.....	225
5.4.3. Требования к интерфейсу «человек-машина».....	226
5.4.4. Требования к щитам управления.....	228
5.5. Требования к независимости выполняемых функций (<i>Ю. В. Розен, М. А. Ястребенецкий</i>).....	229
5.5.1. Обеспечение независимости.....	229
5.5.2. Допускаемая эмиссия помех.....	232
5.5.3. Обеспечение пожаробезопасности.....	232
5.6. Требования к видам обеспечения (<i>Ю. В. Розен, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	233
5.6.1. Программное обеспечение.....	233
5.6.2. Информационное обеспечение.....	235
5.7. Оценка и подтверждение соответствия (<i>Ю. В. Розен</i>).....	236
5.7.1. Общие положения.....	236
5.7.2. Аprobация технических решений и компонентов.....	237
5.7.3. Квалификация оборудования.....	238

5.7.4. Верификация программного обеспечения.....	240
5.7.5. Валидация головных образцов.....	242
5.7.6. Приемочный контроль поставляемых изделий.....	243
5.7.7. Испытания при вводе в эксплуатацию.....	243
5.8. Требования к эксплуатации (<i>Ю. В. Розен</i>).....	244
5.8.1. Общие требования.....	244
5.8.2. Проверки и техническое обслуживание.....	245
5.8.3. Восстановление и ремонт.....	246
5.8.4. Внесение изменений и модернизация.....	248
Список использованной литературы к главе 5.....	250
Глава 6. ПЕРИФЕРИЙНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СУЗ.....	254
6.1. Общие сведения (<i>Ю. В. Розен</i>).....	254
6.1.1. Назначение.....	254
6.1.2. Классификация.....	256
6.1.3. Технические требования.....	259
6.2. Датчики и нормирующие преобразователи (<i>Ю. В. Розен</i>).....	272
6.2.1. Основные понятия.....	272
6.2.2. Статические характеристики.....	276
6.2.3. Структуры датчиков и схемы подключения.....	279
6.2.4. Точностные характеристики.....	292
6.2.5. Динамические свойства.....	296
6.3. Детекторы нейтронного потока (<i>Л. И. Спектор</i>).....	299
6.3.1. Назначение.....	299
6.3.2. Принципы построения детекторов.....	301
6.3.3. Детекторы, применяемые в различных типах АКНП.....	307
6.4. Датчики давления (<i>Ю. В. Розен</i>).....	317
6.4.1. Устройство и принцип действия.....	317
6.4.2. Технические характеристики.....	323
6.4.3. Применение на АЭС.....	329
6.5. Сейсмодатчики (<i>Ю. В. Розен</i>).....	330
6.5.1. Блок сейсмодатчиков БСД 1-01.....	330
6.5.2. Сейсмодатчик СС-1.....	332
6.6. Программируемые логические интегральные схемы (<i>В. В. Склад</i>).....	335
6.6.1. Общие сведения.....	335
6.6.2. Инструментальные средства разработки электронных проектов ПЛИС.....	340
6.6.3. Требования к применению ПЛИС в системах безопасности АЭС.....	343
Список использованной литературы к главе 6.....	346
Глава 7. КОНТРОЛЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА.....	348
7.1. Назначение (<i>Л. И. Спектор</i>).....	348
7.2. Функции (<i>Л. И. Спектор</i>).....	349
7.3. Требования к контролю нейтронного потока (<i>Л. И. Спектор</i>).....	353

7.4. Системы типовых проектов АКНП-3 и АКНП-7-02 (<i>Л. И. Спектор</i>).....	355
7.4.1. Система АКНП-3.....	355
7.4.2. Система АКНП-7-02	360
7.5. Система контроля нейтронного потока АКНП-И (СНПО «Импульс»).....	363
7.5.1. Общее описание (<i>В.В. Елисеев, Л. И. Спектор</i>).....	363
7.5.2. Устройства накопления, обработки и технического обслуживания (<i>В. В. Елисеев, Л. И. Спектор</i>).....	370
7.5.3. Программное обеспечение (<i>В. В. Елисеев, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	374
7.5.4. Обеспечение безопасности (общесистемные аспекты) (<i>В. В. Елисеев, Л. И. Спектор</i>).....	376
7.5.5. Безопасность программного обеспечения (<i>В. В. Елисеев, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	380
7.6. Система контроля нейтронного потока АКНП—ИФ (СНПО «Импульс»).....	383
7.6.1. Общее описание (<i>В. В. Елисеев, Л. И. Спектор</i>).....	383
7.6.2. Устройства накопления и обработки (<i>В. В. Елисеев, Л. И. Спектор</i>).....	393
7.6.3. Программное обеспечение (<i>В. В. Елисеев, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	396
7.6.4. Обеспечение безопасности (общесистемные аспекты) (<i>В. В. Елисеев, Л. И. Спектор</i>).....	400
7.6.5. Безопасность программного обеспечения (<i>В. В. Елисеев, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	403
7.7. Основные отличия различных типов АКНП (<i>Л. И. Спектор</i>).....	404
Список использованной литературы к главе 7.....	407
Глава 8. АВАРИЙНАЯ И ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНАЯ ЗАЩИТА.....	408
8.1. Назначение (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	408
8.2. Функции (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	408
8.3. Требования (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	410
8.3.1. Требования к функциям.....	411
8.3.2. Требования к системам.....	412
8.3.3. Требования к программно-техническим комплексам.....	414
8.4. Типовые проекты систем защиты (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	416
8.4.1. Типовые проекты систем защиты реакторов ВВЭР-440	416
8.4.2. Типовые проекты систем защиты реакторов ВВЭР-1000	426
8.4.3. Сравнение типовых проектов систем защиты.....	451
8.4.4. Дефициты безопасности типовых проектов.....	454
8.5. Некоторые зарубежные системы защиты реакторов (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	457
8.5.1. Системы на базе аппаратуры «СНИИП-СИСТЕМАТОМ».....	457
8.5.2. Системы на базе аппаратуры Siemens Power Corporation.....	462
8.6. Системы на базе аппаратуры НПП «Радий» (ПТК АЗ-ПЗ).....	471
8.6.1. Принципы построения (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен, А. А. Сиора</i>).....	471
8.6.2. Программное обеспечение (<i>А. А. Сиора, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	496
8.6.3. Обеспечение безопасности (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен, А. А.Сиора</i>)	500

8.6.4. Внедрение на АЭС Украины (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен, А. А. Сиора</i>).....	505
Список использованной литературы к главе 8.....	509
Глава 9. РЕГУЛИРОВАНИЕ, РАЗГРУЗКА И ОГРАНИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ..	511
9.1. Назначение (<i>Ю. В. Розен</i>).....	511
9.1.1. Автоматическое регулирование мощности.....	512
9.1.2. Разгрузка и ограничение мощности.....	521
9.1.3. Ускоренная предупредительная защита.....	524
9.1.4. Классификация функций.....	527
9.2. Требования к реализации функций (<i>Ю. В. Розен</i>).....	528
9.2.1. Функция АРМ.....	528
9.2.2. Функция РОМ.....	549
9.2.3. Функция УПЗ.....	551
9.3. Требования к системам (<i>Ю. В. Розен</i>).....	552
9.3.1. Ассоциированные системы и оборудование.....	552
9.3.2. Классификация систем и компонентов.....	558
9.3.3. Требования к системам и компонентам.....	559
9.4. Реализация функций АРМ, РОМ, УПЗ в типовых проектах (<i>Ю. В. Розен</i>).....	571
9.4.1. Принципы построения.....	571
9.4.2. Дефициты безопасности типовых проектов.....	577
9.4.3. Модернизация АРМ, РОМ, УПЗ.....	579
9.5. Системы на базе аппаратуры НПП «Хартрон-Аркос» (<i>Ю. В. Розен</i>).....	580
9.5.1. Принципы построения.....	580
9.5.2. Программное обеспечение.....	583
9.5.3. Обеспечение безопасности.....	585
9.5.4. Внедрение на АЭС Украины.....	588
9.6. Системы на базе аппаратуры НПП «Радий» (<i>Ю. В. Розен, А. А. Сиора</i>).....	588
9.6.1. Принципы построения.....	589
9.6.2. Программное обеспечение.....	600
9.6.3. Обеспечение безопасности.....	602
9.6.4. Внедрение на АЭС Украины.....	608
Список использованной литературы к главе 9.....	608
Глава 10. УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	610
10.1. Назначение (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	610
10.2. Функции (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	611
10.3. Требования к управлению (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	615
10.4. Режимы управления (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	617
10.4.1. Режимы управления реактором ВВЭР-1000.....	617
10.4.2. Режимы управления реактором ВВЭР-440	623

10.5. Система, предусмотренная типовым проектом (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	624
10.5.1. Общие сведения.....	624
10.5.2. Принципы построения.....	625
10.6. Система на базе аппаратуры Skoda (ПТК СГИУ-М) (<i>С. В. Виноградская, Ю. В. Розен</i>).....	636
10.6.1. Общие сведения.....	636
10.6.2. Принципы построения.....	641
10.6.3. Программное обеспечение.....	650
10.6.4. Аprobация и внедрение.....	651
10.7. Система на базе аппаратуры СНПО «Импульс» (ПТК СУОР-И).....	651
10.7.1. Общие сведения (<i>С. В. Виноградская, В. В. Елисеев</i>).....	651
10.7.2. Принципы построения (<i>С. В. Виноградская, В. В. Елисеев</i>).....	654
10.7.3. Программное обеспечение (<i>В. В. Елисеев, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	664
10.7.4. Обеспечение безопасности (<i>С. В. Виноградская, В. В. Елисеев</i>).....	668
10.8. Система на базе аппаратуры СНПО «Импульс» (ПТК СГИУ-И).....	672
10.8.1. Общие сведения (<i>С. В. Виноградская, В. В. Елисеев</i>).....	672
10.8.2. Принципы построения (<i>С. В. Виноградская, В. В. Елисеев</i>).....	673
10.8.3. Программное обеспечение (<i>В. В. Елисеев, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	695
10.8.4. Обеспечение безопасности (<i>С. В. Виноградская, В. В. Елисеев</i>).....	697
10.9. Система на базе аппаратуры НПП «Радий» (ПТК СГИУ).....	699
10.9.1. Общие сведения (<i>С. В. Виноградская, А. А. Сиора</i>).....	699
10.9.2. Принципы построения (<i>С. В. Виноградская, А. А. Сиора</i>).....	699
10.9.3. Программное обеспечение (<i>А. А. Сиора, В. В. Скляр, В. С. Харченко</i>).....	719
10.9.4. Отличительные особенности (<i>С. В. Виноградская, А. А. Сиора</i>).....	721
10.9.5. Обеспечение безопасности (<i>С. В. Виноградская, А. А. Сиора</i>).....	724
Список использованной литературы к главе 10.....	730
Глава 11. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ	732
11.1. Надежность систем контроля нейтронного потока разработки СНПО «Импульс» (<i>В. В. Елисеев, М. А. Ястребенецкий</i>).....	732
11.2. Надежность ПТК разработки НПП «Радий» (<i>А. А. Сиора, М. А. Ястребенецкий</i>).....	735
11.3. Нарушения в работе АЭС из-за неправильного функционирования ИУС.....	738
11.3.1. Классификация нарушений (<i>М. А. Ястребенецкий</i>).....	738
11.3.2. Статистика нарушений (<i>М. А. Ястребенецкий</i>).....	738
11.3.3. Анализ нарушений, связанных с СУЗ (<i>Ю. В. Розен</i>).....	744
11.3.4. Оценка функциональной безопасности ИУС (<i>М. А. Ястребенецкий</i>).....	745
Список использованной литературы к главе 11.....	755
Заключение. БУДУЩЕЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АЭС (<i>Г. Джонсон</i>).....	756
Сведения об авторах.....	765