

**ФГУП САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»,
г. Санкт Петербург**

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ
«СЕВЗАПМОНТАЖАВТОМАТИКА», г. Санкт Петербург**

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва

**УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора СПбАЭП по
научной работе**

В.В. Безлепкин

« 16 » мая 2005 г.

**УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
СПИК СЗМА**

А.А. Нозик

М.П. « 16 » мая 2005 г.

**УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора ИПУ РАН**

Б.В. ПАВЛОВ М.П.

« 16 » мая 2005 г.

М.П.

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДЕРЕВЬЕВ ОТКАЗОВ И
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МО-
ДЕЛИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО
ВЕРОЯТНОСТНОМУ АНАЛИЗУ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС И АСУТП НА
СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

(Шифр темы: «Технология-2004»)

Ответственные исполнители:

От **ФГУП СПб АЭП**

д.т.н., профессор Ершов Г.А.

От **ОАО "СПИК СЗМА"**

д.т.н., профессор **Можаев А.С.**

От **ИПУ РАН**

к.т.н. Викторова В.С.

Санкт-Петербург 2005

Исполнители

Солодовников А.С.	ФГУП СПб АЭП
Козлов Ю.И.	ФГУП СПб АЭП
Ермакович Ю.Л.	ФГУП СПб АЭП
Соболев А.Н.	ФГУП СПб АЭП
Нозик А.А.	ОАО "СПИК СЗМА"
Струков А.В.	ОАО "СПИК СЗМА"
Скворцов М.С.	ОАО "СПИК СЗМА"
Степанянц А.С.	ИПУ РАН

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
Глава 1. Основные положения и методические основы решения задач оценки надежности, безопасности и риска систем на основе технологии автоматизированного моделирования, реализованной в программных комплексах Relex, АСМ И Risk Spectrum.....	12
1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ и МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОЙ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ КОМПАНИИ "RELEX SOFTWARE"	13
1.1.1. Технология расчета надежности, безопасности, эффективности, основанная на совместном использовании блок-схем надежности, деревьев отказов, Марковских графов, реализованная в программном комплексе Relex (США).....	13
1.1.1.1. Состав модулей программного комплекса Relex	13
1.1.1.2. Краткое описание модулей системного анализа ПК Relex	14
1.1.1.2.1 Модуль блок-схем надежности	14
1.1.1.2.2 Модуль деревьев отказов.....	16
1.1.1.2.3 Модуль Марковского моделирования.....	19
1.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ и МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОЙ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ ПК АСМ КОМПАНИИ "СПИК СЗМА"	21
1.2.1. Содержание этапов ОЛВМ.....	21
1.2.1.1. Средства и методы постановки задач в ОЛВМ	22
1.2.1.1.1 Изобразительные средства и типовые фрагменты СФЦ	23
1.2.1.1.1.1 Функциональные вершины СФЦ	23
1.2.1.1.1.2 Дизъюнктивные ребра (дуги) в СФЦ	23
1.2.1.1.1.3 Фиктивные вершины в СФЦ.....	25
1.2.1.1.1.4 Конъюнктивные дуги в СФЦ.....	25
1.2.1.1.2 Использование дизъюнктивных и конъюнктивных дуг в СФЦ	26
1.2.1.1.3 Размножение функциональных вершин.....	27
1.2.1.1.4 Представление логической операции инверсирования в СФЦ.....	27
1.2.1.1.5 Обобщенный структурный фрагмент СФЦ	28

1.2.1.2.	Методика построения СФЦ.....	29
1.2.1.2.1	Общие замечания и рекомендации	29
1.2.1.2.2	Основные этапы построения СФЦ	30
1.2.1.2.3	Задание логических критериев и параметров элементов	32
1.2.1.3.	Средства и методы построения математических моделей	32
1.2.1.3.1	Построение логических функций работоспособности систем.....	32
1.2.1.3.2	Построение многочленов вероятностных функций	33
1.2.1.4.	Методы вычисления показателей надежности и безопасности систем	33
1.2.1.4.1	Расчет безотказности невосстанавливаемых систем	34
1.2.1.4.1.1	Расчет вероятности безотказной работы невосстанавливаемой системы.....	34
1.2.1.4.1.2	Расчет средней наработки до отказа	34
1.2.1.4.2	Расчет безотказности восстанавливаемых систем	35
1.2.1.4.2.1	Расчет коэффициентов готовности элементов	35
1.2.1.4.2.2	Расчет коэффициента готовности восстанавливаемой системы.....	35
1.2.1.4.2.3	Расчет средней наработки между отказами и среднего времени восстановления Ошибка! Закладка не определена.	
1.2.1.4.2.4	Расчет вероятности безотказной работы восстанавливаемой системы	36
1.2.1.4.2.5	Расчет значимостей и вкладов элементов.....	36
1.3.	ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛИЗОВАННОЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «RISK SPECTRUM».....	39
1.3.1.	Краткая характеристика ПК Risk Spectrum.	39
1.3.2.	Способы расчета вероятностных показателей надежности базисных событий.....	44
1.3.2.1.	Модель непрерывно контролируемого восстанавливаемого компонента (тип 1)	45
1.3.2.2.	Модель периодически проверяемого компонента (тип 2).....	45
1.3.2.3.	Модель с постоянным значением величины неготовности (тип 3).....	47
1.3.2.4.	Модель с заданным рассматриваемым промежутком времени (тип 4)	47
1.3.2.5.	Модель постоянного значения частоты (тип 5).....	48
1.3.2.6.	Модель невосстанавливаемого компонента (тип 6).....	48
1.3.3.	Параметры моделей надежности	49
1.3.3.1.	Типы параметров	49
1.3.3.2.	Распределения неопределенностей для параметров моделей надежности	50
1.3.4.	Деревья отказов	50
1.3.5.	Моделирование отказов по общей причине	53
1.3.5.1.	Логика модели ООП.....	53
1.3.5.2.	Расчет вероятностей ООП	53
1.3.5.2.1	Модель бета-фактора	54
1.3.5.2.2	Модель множественных греческих букв (МГБ).....	55
1.3.5.2.3	Модель альфа-фактора.....	55
1.3.5.3.	Квантификация ООП для шахматного порядка испытаний.....	56
1.3.6.	Деревья событий	56
1.3.6.1.	Исходные события.....	56
1.3.6.2.	Функциональные события	57
1.3.6.3.	Учет вероятностей успешной реализации функционального события при расчетах вероятностей реализации конечных состояний	57
1.3.7.	Генерация и анализ минимальных сечений отказов.....	59
1.3.7.1.	Краткая характеристика задачи генерации и анализа МСО.....	59
1.3.7.2.	Формирование структуры дерева	61
1.3.7.3.	Вычисление неготовностей основного события	62

1.3.7.4.	Реструктурирование и модуляризация дерева отказов.....	63
1.3.7.5.	Обработка модулей	64
1.3.7.6.	Генерация множеств минимальных сечений.....	65
1.3.8.	Квантификация МСО.....	72
1.3.9.	Анализ неопределенности.....	79
1.3.9.1.	Технические требования анализа неопределенности	79
1.3.9.2.	Моделирование значений параметров.....	80
1.3.9.3.	Вычисление результатов верхнего события в процессе моделирования... ..	80
1.3.9.4.	Сбор распределения неопределенности.....	80
1.3.10.	Анализ значимости и чувствительности.....	81
1.3.10.1.	Значимость для базисных событий.....	82
1.3.10.2.	Значимость для групп основных событий	83
1.3.10.3.	Значимость для атрибутов	83
1.3.10.4.	Значимость для параметров.....	83
1.3.10.5.	Вычисления показателей чувствительности.....	84
1.3.11.	Выполнение анализа показателей надежности и безопасности как функции времени.	85
1.3.11.1.	Технические требования анализа показателей надежности и безопасности в функции времени	85
1.3.11.2.	Расчет интервалов времени	85
1.3.11.3.	Вычисление результатов верхнего события для каждого момента времени	86
Глава 2. Примеры решения задач оценки надежности и безопасности сложных технических систем с помощью программных комплексов «relex», «АСМ», «Risk Spectrum».....		91
2.1.	Оценка надежности Системы электроснабжения (Задача № 35).	92
2.1.1.	Описание задачи	92
2.1.2.	Результаты решения на ПК «RELEX».....	93
	Пример 1. Расчет надежности СЭС при заданных вероятностях безотказной работы элементов, независящих от времени.	93
	Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения	93
	Пример 3. Расчет восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения	94
	Пример 4. Расчет смешанной СЭС с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами	95
	Пример 5. Автоматическое определение списка минимальных путей.....	96
	Пример 6. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов СЭС	97
	Пример 7. Расчет значимостей и вкладов элементов СЭС.....	97
	Пример 8. Немонотонная модель функционирования СЭС.....	97
2.1.3.	Результаты решения на ПК АСМ СЗМА	103
	Пример 1. Расчет надежности СЭС при заданных вероятностях безотказной работы элементов, независящих от времени.	103
	Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения	104
	Пример 3. Расчет восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.....	105

Пример 4. Расчет смешанной СЭС с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами.....	106
Пример 5. Автоматическое определение списка минимальных путей.....	108
Пример 6. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов СЭС.....	109
Пример 7. Расчет значимостей и вкладов элементов СЭС.....	109
Пример 8. Немонотонная модель функционирования СЭС.....	111
2.1.4. Результаты решения задач анализа СЭС на ПК «RISK SPECTRUM».....	114
Пример 1. Расчет надежности СЭС при заданных вероятностях безотказной работы элементов, независимых от времени.....	118
Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.....	119
Пример 3. Расчет восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.....	120
Пример 4. Расчет смешанной СЭС с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами.....	122
Пример 5. Автоматическое определение списка кратчайших путей успешного функционирования СЭС.....	122
Пример 6. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов СЭС.....	122
Пример 7. Расчет показателей относительной важности элементов СЭС.....	123
Пример 8. Немонотонная модель функционирования СЭС.....	124
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.1.....	127
2.2. Расчет надежности системы с резервированием по схеме «К из N».....	130
2.2.1. Описание задачи.....	130
2.2.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	130
Пример 1. Расчет звеньев с заданными вероятностями безотказной работы элементов, независимыми от времени.....	130
Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемого звена с резервированием замещением и с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.....	131
Пример 3. Расчет невосстанавливаемого звена со скользящим резервированием с заданной интенсивностью отказов элементов в предположении экспоненциального распределения.....	131
Пример 4. Автоматическое определение списка минимальных путей.....	132
2.2.3. Результаты решения НА ПК АСМ.....	133
Пример 1. Расчет звеньев с заданными вероятностями безотказной работы элементов, независимыми от времени.....	133
Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемого звена с резервированием замещением и с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.....	134
Пример 3. Расчет невосстанавливаемого звена со скользящим резервированием с заданной интенсивностью отказов элементов в предположении экспоненциального распределения.....	136
Пример 4. Автоматическое определение списка минимальных путей.....	137
2.2.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM».....	139
Пример 1. Расчет звеньев с заданными вероятностями безотказной работы элементов, независимыми от времени.....	139

Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемого звена с резервированием замещением и с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.....	139
Пример 3. Расчет невосстанавливаемого звена со скользящим резервированием с заданной интенсивностью отказов элементов в предположении экспоненциального распределения.....	141
Пример 4. Автоматическое определение списка минимальных сечений	142
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.2.....	144
2.3. Расчет надежности фрагмента ядерной энергетической установки.....	146
2.3.1. Описание задачи	146
2.3.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	147
Пример 1. Расчет надежности ЯЭУ по заданным вероятностям безотказной работы элементов, независимым от времени.....	147
Пример 2. Расчет восстанавливаемой системы с заданными средними наработками до отказа и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.....	147
Пример 3. Список минимальных путей	148
Пример 4. Список минимальных сечений отказов.....	148
2.3.3. Результаты решения на ПК АСМ	149
Пример 1. Расчет надежности ЯЭУ по заданным вероятностям безотказной работы элементов, независимым от времени.....	149
Пример 2. Расчет восстанавливаемой ЯЭУ с заданными средними наработками до отказа и средним временем восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.....	150
Пример 3. Список минимальных путей	151
Пример 4. Список минимальных сечений отказов.....	152
2.3.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	153
Пример 1. Расчет надежности ЯЭУ по заданным вероятностям безотказной работы элементов, независимым от времени.....	153
Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой ЯЭУ с заданными средними наработками до отказа и средним временем восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения	153
Пример 3. Список минимальных путей	153
Пример 4. Список минимальных сечений отказов.....	155
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.3.....	157
2.4. Расчет надежности мостиковой схемы.....	159
2.4.1. Описание задачи	159
2.4.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	160
Пример 1. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.....	160
Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с заданными средними наработкам на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.....	160
Пример 3. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов	161
Пример 4. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления.	161
Пример 5. Расчет надежности невосстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов.	161

Пример 6. Расчет надежности восстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления.....	162
Пример 7. Решение задачи “Мостик” с учетом отказов по общей причине в модуле Relex Fault Tree	162
2.4.3. Результаты решения на ПК АСМ	165
Пример 1. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.....	165
Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с заданными средними наработкам на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.....	166
Пример 3. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов	167
Пример 4. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления	168
Пример 5. Второй вариант расчета надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов.....	168
Пример 6. Расчет надежности восстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления.....	169
Пример 7. Решение задачи "Мостик" с учетом отказов по общей причине.....	169
Пример 8. Решение задачи "Мостик" на основе СФЦ, эквивалентной дереву отказов.....	169
Пример 9. Решение на ПК АСМ прямой задачи «Мостик» на основе СФЦ дерева "успеха"	172
Пример 10. Задача «Мостик» с учетом принятой стратегии технического обслуживания и ремонта.....	175
2.4.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	176
Пример 1. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.....	176
Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с заданными средними наработкам на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.....	177
Пример 3. Решение прямой задачи «Мостик» на ПК «Risk Spectrum».....	177
Пример 4. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой схемы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов.....	178
Пример 5. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой схемы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов и экспоненциальным законом времени их восстановления.....	178
Пример 6. Решение задачи «Мостик» с учетом отказов по общей причине.....	178
Пример 7. Решение задачи «Мостик» с учетом принятой стратегии технического обслуживания и ремонта.....	180
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.4.....	184
2.5. Расчет производительности (пропускной способности) системы.....	186
2.5.1. Описание задачи	186
2.5.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	186
2.5.3. Результаты решения на ПК «АСМ»	187

2.5.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	187
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.5.....	188
2.6. Фазовые диаграммы	189
2.6.1. Описание задачи	189
2.6.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	189
2.6.3. Результаты решения на ПК «АСМ»	191
2.6.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	192
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.6.....	196
2.7. Расчет безопасности участка железной дороги.....	197
2.7.1. Описание задачи	197
2.7.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	197
2.7.3. Результаты решения на ПК «АСМ»	199
2.7.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	209
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.7.....	217
2.8. Расчет надежности системы с защитой.....	219
2.8.1. Описание задачи	219
2.8.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	220
2.8.3. Результаты решения на ПК «АСМ»	221
2.8.4. Результаты решения на «RISK SPECTRUM».....	224
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.8.....	227
2.9. Расчет надежности и эффективности системы с защитой.....	229
2.9.1. Описание задачи	229
2.9.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	231
2.9.3. Результаты решения на ПК «АСМ»	233
2.9.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	233
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.9.....	235
2.10. Расчет надежности вычислительной системы с синхронизатором.....	236
2.10.1. Описание задачи	236
2.10.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	236
2.10.3. Результаты решения на ПК «АСМ»	238
Пример 1. Приближенное решение задачи расчета надежности системы с синхронизатором с помощью ПК АСМ	238
Пример 2. Точное решение задачи расчета надежности системы с синхронизатором в технологии АСМ.....	239
2.10.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	241
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.10.....	242
2.11. Анализ различных сценариев аварий на установке первичной переработки нефти.....	243
2.11.1. Описание задачи	243
2.11.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	245
2.11.3. Результаты решения на ПК «АСМ»	246
Пример 1. Анализ различных сценариев аварий на установке первичной переработки нефти	246
Пример 2. Автоматизированное моделирование и расчет ожидаемого ущерба от аварии на установке первичной переработки нефти	247
2.11.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	250
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.11.....	257
2.12. Анализ безопасности автоматизированной заправочной станции	259
2.12.1. Описание задачи	259
2.12.2. Результаты решения на ПК «RELEX».....	261
2.12.3. Результаты решения на ПК «АСМ»	263

Пример 1. Решение задачи ВАБ заправочной станции на основе СФЦ безопасности	263
Пример 2. Решение задачи ВАБ на основе СФЦ дерева отказа заправочной станции	265
2.12.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»	268
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.12	271
ЗАКЛЮЧЕНИЯ	272
1. Заключение специалистов ИПУ РАН	272
2. Заключение специалистов СПИК СЗМА	275
3. Заключение специалистов СПБАЭП	278
4. Общее заключение специалистов ИПУ РАН, СПИК СЗМА и СПБАЭП	280
ЛИТЕРАТУРА	281