

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

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «СЕВЗАПМОН-
ТАЖ АВТОМАТИКА», г. Санкт Петербург**

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

Экз. № _____

УТВЕРЖДАЮ

**Зам. директора СПБАЭП по науч-
ной работе**

В.В. Безлепкин

« » _____ 2005 г.

УТВЕРЖДАЮ

**Генеральный директор СПИК
СЗМА**

А.А. Нозик

« » _____ 2005 г.

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ИПУ РАН

Б.В. ПАВЛОВ

« » _____ 2005 г.

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

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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.....	36
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 невозстанавливаемого 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, независимых от времени.	93
Пример 2. Расчет надежности невозстанавливаемой 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 невозстанавливаемыми 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, независимых от времени.	103
Пример 2. Расчет надежности невозстанавливаемой 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 невозстанавливаемыми 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 невозстанавливаемой 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 невозстанавливаемой 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 невозстанавливаемой 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

ВВЕДЕНИЕ

Целью выполнения данной НИР является получение обоснованных качественных и количественных характеристик трех технологий автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности и безопасности структурно-сложных систем:

1. Технологии деревьев отказов и деревьев событий (программный комплекс Risk Spectrum Шведской фирмы Relkon AB), применяемой ФГУП "СПбАЭП" для проведения вероятностного анализа безопасности (ВАБ) и расчета показателей надежности систем проектируемых атомных электростанций (АЭС);

2. Технологии АСМ (автоматизированного структурно-логического моделирования, программные комплексы ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ СЗМА БД, ПК АСМ 2001, NEWАСМ, NEWАСМ-3 и др.), применяемой в ОАО "СПИК СЗМА" для оценки надежности и безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на стадии проектирования.

3. Технологии и программных средств автоматизированного моделирования показателей надежности и безопасности (программный комплекс Relex), используемый специалистами ИПУ РАН, представляющими Компанию Relex Software.

При исследованиях использовались, как правило, последние версии кодов АСМ и Relex и версия 1.20 кода Risk Spectrum.

Следует отметить, что с самого начала работы по договоренности всех участников, не ставилась задача качественной оценки существующих программ и программных комплексов автоматизированного моделирования, хотя в какой то степени она неизбежно присутствует в результатах исследований. Хотелось собрать воедино такой теоретический, методологический и экспериментальный материал, который помог бы всем участвующим сторонам увидеть научную и практическую перспективу дальнейшего развития относительного нового научного направления – автоматизации моделирования надежности, безопасности и риска различных системных объектов большой размерности и высокой структурной сложности.

Основу данной НИР составляют примеры постановки и решения, с помощью разных программных комплексов, относительно малоразмерных, но четко поставленных задач автоматического построения математических моделей и выполнения расчетов показателей надежности и безопасности систем различных видов, классов и назначения.

Результаты данной работы предполагается использовать в СПбАЭП, СПИК СЗМА и ИПУ РАН при совершенствовании методик и программных комплексов, реализующих различные теории и технологии для автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности и безопасности проектируемых системных объектов.

Отчет по данной НИР разделен на две относительно самостоятельные части. Каждый раздел разрабатывался совместно специалистами ИПУ РАН, ОАО "СПИК СЗМА и ФГУП "СПбАЭП". Примеры решались с помощью соответствующих методов, технологий и программных средств автоматизированного моделирования, применяемых в этих организациях (Relex, ПК АСМ и Risk Spectrum).

Первый раздел отчета состоит из трех частей. В каждой части излагаются основы применяемой теории, технологии и сообщаются краткие сведения об используемых программных средствах автоматизированного моделирования. Во втором разделе приводятся описания постановки конкретных примеров рассматриваемых классов задач и результаты их решения с помощью соответствующих технологий и программных средств автоматизированного моделирования.

В процессе обмена результатами моделирования и расчетов участники выполняли сравнительный анализ применяемых теорий и технологий автоматизированного моделирования.

Во втором разделе, после результатов решения каждого примера всеми тремя технологиями, приводятся выводы о полноте и качестве решения указанного примера каждым из программных комплексов. Каждый подраздел раздела 2 завершается выводами специалистов участвующих организаций

В конце всей работы приводятся заключения специалистов каждой организации и общее заключение о проделанной работе. Главным предназначением заключений является оценка перспективности продолжения дальнейшего сотрудничества в данной области научных исследований и практических разработок отечественной теории, технологии и программных средств автоматизированного структурного моделирования надежности, безопасности и риска сложных систем различных видов, классов и назначения.

**ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И
РИСКА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРО-
ВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОЙ В ПРОГРАММ-
НЫХ КОМПЛЕКСАХ RELEX, АСМ И RISK SPECTRUM.**

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"

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)

1.1.1.1. Состав модулей программного комплекса Relex

В состав программного комплекса (ПК) Relex входят 8 аналитических модулей:

- Прогнозирование Безотказности (Reliability Prediction);
- Прогнозирование Ремонтопригодности (Maintainability Prediction);
- Анализа Видов, Последствий и Критичности Отказов (FMEA/FMECA);
- Блок-Схемы Надежности (Reliability Block Diagram);
- Деревья Отказов/Событий (Fault Tree/Event Tree);
- Марковский Анализ (Markov Analysis);
- Статистический Анализ (Weibull Analysis);
- Оценка стоимости срока службы (Life Cycle Cost).

ПК Relex может формироваться из произвольного количества взаимодействующих и разделяющих единую базу данных модулей:

Модуль прогнозирования надежности содержит модели для расчета показателей надежности элементов. В модуль включена обширная база данных (~300 000 наименований), содержащая классификационные признаки элементов и характеристики надежности. Расчеты проводятся в соответствии со стандартами: MIL-HDBK-217, Telcordia (Bellcore) TR-332, Prism, NSWC-98/LE1, CNET93, HRD5, 299B.

Модуль анализа ремонтнопригодности реализует положения стандарта по исследованию ремонтнопригодности систем - MIL-HDBK-472. Решаются задачи прогнозирования профилактического технического обслуживания.

Модуль анализа видов, последствий и критичности отказов. Анализ проводится в соответствии со стандартами MIL-STD-1629, SAE ARP 5580 и др. Производится ранжирование опасных отказов и их оценка по приоритетам рисков.

Модуль блок-схемы надежности используется для анализа сложных резервированных систем. Содержит как аналитические методы, так и методы моделирования Монте Карло.

Модуль дерева отказов/дерева событий. Реализованы процедуры для дедуктивного и индуктивного анализа развития отказов, событий в системе. Применяется для анализа надежности и безопасности. Содержит широкий набор логико-функциональных вершин.

Модуль марковского анализа. Реализовано марковское моделирование надежности, производительности, безопасности, рисков. Начиная с версии 7.7, добавлены марковские процессы с доходами. Позволяет учитывать сложные режимы функционирования, различные виды отказов, особенности обслуживания.

Модуль "Weibull". Предназначен для обработки статистических данных испытаний, эксплуатации. Поддерживается большой спектр распределений.

Модуль экономических расчетов (LCC). Осуществляется оценка стоимости срока службы на всех этапах создания, эксплуатации, утилизации системы. Проводятся оценки экономических показателей продления ресурса. Имеется встроенный редактор формул, позволяющий реализовать свои экономические воззрения.

Модули содержат визуальный редактор задания модели анализируемой системы непосредственно на экране компьютера. Реализованы настраиваемые отчеты, вывод на графики, язык написания макросов. Система полностью документирована, содержит развитый Help. В ПК встроен мастер импорта/экспорта исходных данных в/из текстовых файлов, электронных таблиц, баз данных, WOM файлов.

В рамках данной НИР будет проанализирована работа модулей, реализующих методы системного анализа надежности, производительности, безопасности – блок-схемы надежности, деревья отказов, марковские процессы.

1.1.1.2. Краткое описание модулей системного анализа ПК Relex

1.1.1.2.1 Модуль блок-схем надежности

Модуль блок схем надежности (RBD) предназначен для исследования надежности и производительности резервированных, восстанавливаемых систем с произвольными законами распределения случайных времен работы до отказа и восстановления элементов. Вычислительный блок модуля осуществляет расчет показателей безотказности, готовности и производительности аналитическими методами и статистическим Монте-Карло моделированием с ускорением.

При расчетах надежности и производительности в RBD возможен учет следующих факторов:

- вид резервирования (постоянное, замещением, скользящее);
- вероятность и время успешного подключения резерва;
- нагруженность резерва;
- механизм проявления отказа;
- различные стратегии восстановления;
- наличие ЗИП, профилактического обслуживания и технических осмотров;

Результатом работы RBD является вычисление следующих показателей:;

- вероятность безотказной работы;
- средняя наработка до отказа;
- интенсивность отказов системы;
- коэффициент готовности (стационарный, нестационарный);
- параметр потока отказов;
- среднее число отказов;
- средняя наработка на отказ;
- производительность и др.

Для расчета сложных, но декомпозируемых систем, в RBD реализована вложенность блоков – каждый блок может быть представлен другой RBD, причем степень вложенности ограничивается лишь объемами оперативной памяти. Взаимодействие RBD с другими модулями Relex осуществляется через связь блоков с соответствующими объектами (элемент или сборка из модуля Прогнозирования Безотказности, объект модуля АВОПК, объект дерева отказов).

Начиная с версии 7.6, в Relex RBD введена возможность решения оптимальных задач надежности: определения числа резервных элементов, максимизирующего показатели надежности/производительности или минимизирующего стоимость системы; опре-

деление оптимальных периодов профилактического обслуживания или технических осмотров.

В версию 7.7 добавлен новый вид блок-схем – фазовые диаграммы, используемые для моделирования надежности систем, чье время функционирования можно разбить на стадии (фазы), каждая из которых характеризуется своей длительностью, величинами интенсивностей отказов элементов, надежностной структурой.













Для создания блок-схем и проведения соответствующих расчетов необходимо выполнить следующие шаги:

1. Создать новый или открыть имеющийся файл проекта Relex (*.rj). В верхнем левом окне проекта перейти на вкладку RBD Table. С помощью команды системного меню Insert/New RBD создать новую диаграмму и вставить новую запись в таблицу. Ввести в строку таблицы имя и описание создаваемой диаграммы.
2. Набрать блок-схему с помощью операций вставки блока (Insert/Figure или Ctrl+G) и соединения блоков в заданную конфигурацию. Соединение осуществляется щелчком мыши на выходе нужного блока и ведением (при нажатой левой клавиши мыши) возникшей соединительной линии (коннектора в терминологии Relex RBD) до входа другого блока. При организации соединений необходимо помнить, что разветвление связей может осуществляться только через специальные переходники (Junction в терминологии Relex RBD). Вставка переходника – Insert/Junction или Ctrl+J. Для схем с простыми соединениями (например, последовательных) можно включить режим автоматического соединения – RBD/Auto Connect Figures. При работе с визуальным редактором RBD можно пользоваться многоуровневой командой Undo (Ctrl+Z или кнопка на панели инструментов), командами перемещения, выделения, удаления, копирования, вырезки, вставки компонентов диаграмм.
3. Настроить визуальные свойства вершин. Для этого при выделенной вершине нажимается правая клавиша мыши и из всплывающего меню выбирается пункт “Visual Properties”. На вкладках появившейся диалоговой панели General, Text, Graphic, Size, Color, Text Display настраиваются цвет, форма и размер вершин, содержание и форматы надписей.
4. Настроить расчетные свойства вершин. Для этого при выделенной вершине нажимается правая клавиша мыши и из всплывающего меню выбирается пункт “Calculation Properties”. На вкладках появившейся диалоговой панели настраиваются расчетные свойства:
 - General – признак повторяемости, стоимость, производительность блока
 - Failure – вид и параметры функции распределения случайного времени отказа блока, механизм проявления отказа, коэффициент нагруженности; на этой же вкладке представляется возможность сопряжения с модулем обработки статистических данных об отказах данного блока
 - Redundancy – вид резервирования и количество резервных компонентов блока, вероятность и время успешного подключения резерва
 - Maintenance – три группы свойств ремонтпригодности:
 - а) Corrective – на этой вкладке задаются параметры восстановления (число ремонтных бригад, момент начала восстановления, функция распределения и параметры случайного времени восстановления, процентное соотношение восстанавливаемых и невосстанавливаемых отказов на рассматриваемом периоде времени, различного рода стоимостные и ресурсные характеристики, нужные для решения оптимизационных задач)

- b) Preventive – на этой вкладке задаются параметры профилактического обслуживания (периодичность, функция распределения и параметры случайного времени обслуживания, стоимостные и ресурсные характеристики профилактики)
 - c) Inspection - на этой вкладке задаются параметры технических осмотров, аналогичные параметрам профилактического обслуживания, и определяется режимы проведения осмотров (оперативный или с выключением осматриваемых компонентов)
- Spreading – три группы свойств ЗИПа, определяющих количество, места расположения (Onsite/Offsite/Repair Shop), обновления, стоимостные и ресурсные характеристики
5. Если блок диаграммы предназначен для внедрения других объектов Relx, то вместо пункта 4 необходимо задать связь этого блока с нужным объектом (элемент, сборка, запись АВОПК, дерево отказов, другая RBD). Элемент или сборку можно перетаскать на лист диаграммы с помощью операций перетаскивания (drag and drop). Связь с другими объектами устанавливается выбором пунктов всплывающего меню Set Data Link или Set Diagram Link.
 6. Настроить свойства переходников. Для этого при выделенном переходнике нажимается правая клавиша мыши и из всплывающего меню выбирается пункт “Properties”. На вкладках появившейся диалоговой панели настраиваются
 - визуальные свойства: форма, размер, цвет, расположение входов/выходов, надпись, формат надписи
 - свойства резервирования (redundancy): вид надежного соединения блоков, входящих в данный переходник (параллельное, последовательное, замещением с произвольной степенью нагруженности)
 7. Настроить свойства коннекторов. Для этого при выделенном коннекторе нажимается правая клавиша мыши и из всплывающего меню выбирается пункт “Properties”. На вкладках появившейся диалоговой панели настраиваются визуальные свойства (толщина, стиль, цвет), задается приоритет связи.
 8. Провести расчеты надежности и производительности. Для этого необходимо:
 - Выбрать пункт системного меню Project/Calculate, на появившейся панели многостраничного диалога выбрать вкладку Calculation Selection (Выбор Расчета) и поставить галочку в окошке выбора, соответствующем RBD.
 - На вкладке RBD задать интервал времени и количество промежуточных точек, на которых выводятся результаты вычислений. Здесь же формируется набор вычисляемых показателей безотказности, готовности, производительности.
 - На вкладке RBD Advanced задать параметры Монте-Карло моделирования (число итераций, доверительные интервалы), выбрать тип сети – потоковая или электрическая (необходимо при вычислении показателей производительности).
 - Нажать кнопку ОК для запуска вычислений. Результаты расчета можно просмотреть, выбрав пункт системного меню View/RBD Calculation Results. Для просмотра путей или сечений выбираются пункты меню View/Path Sets или View/Cut Sets соответственно.
 9. Создать отчеты нужного формата с помощью Мастера Отчетов (File/Print Preview).

1.1.1.2.2 Модуль деревьев отказов

Модуль деревьев отказов (FT) предназначен для исследования надежности и безопасности систем. Модуль Relex FT лишен недостатков и ограничений классических деревьев отказов за счет введения новых логико-динамических операторов (вершин), учитывающих зависимость событий, временные соотношения, приоритеты. В таблице приведен список вершин и событий, реализованных в Relex.

вершина	название	описание
	AND	логическое И
	OR	логическое ИЛИ
	NAND	логическое И-НЕ
	NOR	логическое ИЛИ-НЕ
	NOT	логическое НЕ
	VOTING (k/n)	m/n голосование (мажоритарный выбор)
	INHIBIT	логическое И с запрещающим входом (ингибиторное И)
	XOR	исключающее ИЛИ
	PRIORITY AND	приоритетное И (динамический оператор)
	FDEP	учитывает зависимости между событиями и временной порядок (динамический оператор)
	SPARE	учитывает состояние резерва, в частности, нагруженности, (динамический оператор)
	SEQ	учитывает последовательность возникновения событий (динамический оператор)

В модуле деревьев отказов Relex предусмотрено также моделирование с общими элементами в различных ветвях дерева и с общими причинами отказов. Для учета отказов по общей причине используется несколько моделей (в литературе они известны под названиями: β -факторная модель, MGL-модель, α -модель, BFR модель).

Введенные новые операторы, общие элементы и общие причины позволяют учитывать в модели многие особенности, присущие возникновению опасных последствий и технические, алгоритмические, организационные меры по обеспечению безопасности.

В модуле осуществляется расчет следующих показателей:

- вероятность отказа;
- неготовность;
- параметр потока отказов;
- среднее число отказов.

Значения показателей вычисляются как для вершинного события, так и для каждого промежуточного.

Кроме того, для каждого выделенного события (как вершинного, так и промежуточного) могут просматриваться и анализироваться наборы соответствующих минимальных сечений.

Если дерево отказов очень велико, то для увеличения скорости вычислений можно осуществить приближенную оценку без существенного снижения точности. Это достигается ограничением числа учитываемых сечений, пренебрегая сечениями с малой вероятностью, использованием методов суммирования сечений, ограничения числа пересечений, Эзари-Прошана.

Возможно проведение сравнения относительной важности различных событий, используя методы Бирнбаума, критичности, Фусселя-Везели.

Деревья отказов интегрированы с остальными модулями Relex. Любому событию дерева могут быть соотнесены

- элементы или сборки модуля прогнозирования безотказности;
- виды отказов из FMEA/FMECA;
- граф переходов из Relex Марков;

Само же дерево может быть соотнесено блокам модуля Relex RBD.

Для создания дерева и проведения соответствующих расчетов необходимо выполнить следующие шаги:

1. Создать новый или открыть имеющийся файл проекта Relex (*.rpj). В верхнем левом окне проекта перейти на вкладку Fault Tree Table. С помощью команды системного меню Insert/New Top Gate создать вершинное событие. И далее, следуя логике сверху-вниз, для каждой вершины-события определять входные события и их логику, вплоть до базисных, далее не развиваемых событий. Определить входы (Gate, Basic Event) можно:

- командами системного меню Insert/Input, Insert/Gate, Insert/Event
- на вкладке Inputs многостраничной диалоговой панели свойств, вызываемой двойным щелчком вершины или нажатием правой клавиши мыши

2. Описать визуальные и расчетные свойства вершин-событий.

3. Если событие предназначено для внедрения других объектов Relex, то вместо пункта 2 необходимо задать его связь с нужным объектом (элемент, сборка, запись АВОПК, марковский граф). Связь с другими объектами устанавливается выбором пунктов всплывающего меню Set Data Link.

4. Провести расчеты надежности и безопасности. Для этого необходимо:

- Выбрать пункт системного меню Project/Calculate, на появившейся панели многостраничного диалога выбрать вкладку Calculation Selection (Выбор Расчета) и поставить галочку в окошке выбора, соответствующем Fault Tree.
- На вкладке Fault Tree задать интервал времени и количество промежуточных точек, на которых выводятся результаты вычислений, сформировать набор вычисляемых показателей и настроить параметры вычислений.
- Нажать кнопку ОК для запуска вычислений. Результаты расчета можно увидеть, выбрав пункт системного меню View/Fault Tree Calculation Results. Выбрав пункт всплывающего меню Highlight Cut Sets, можно на построенном дереве просмотреть минимальные сечения.

5. Создать отчеты нужного формата с помощью Мастера Отчетов (File/Print Preview).

1.1.1.2.3 Модуль Марковского моделирования

Марковские процессы давно и с успехом применяются в моделировании и анализе надежности систем. Разрабатываемые с помощью этого аппарата модели являются динамическими и позволяют отражать необходимые временные условия и другие особенности, зависимости, которые конкретизируют траекторию переходов системы в пространстве возможных состояний, образованных отказами, восстановлением элементов.

В Relex реализованы марковские процессы с дискретным множеством состояний и непрерывным временем, позволяющие учитывать следующие особенности функционирования и резервирования систем:

- несовместные виды отказов элементов;
- последовательность возникновения отказов;
- изменение интенсивностей отказов элементов в зависимости от уже происшедших событий (в частности, степень нагруженности резерва);
- количество бригад по восстановлению (ограниченное, неограниченное восстановление);
- очередность восстановления;
- ограничения на ЗИП;
- различную эффективность функционирования в различных состояниях системы и доходы (потери) за переходы в состояния.

Известные проблемы марковского моделирования, связанные с размерностью и жесткостью порождаемых в процессе моделирования систем дифференциальных уравнений, успешно решены в Relex Markov.

Реализованные в Relex методы позволяют решать жесткие и плохо обусловленные системы, в частности, тестирование программы на примере с числом обусловленности порядка 10^{25} дает удовлетворительные результаты. Возможность получения решения систем с таким числом обусловленности вполне достаточна на практике. Relex, практически, не содержит ограничений на число состояний исследуемой системы. Оно ограничивается лишь размером оперативной памяти.

Вычисляемые показатели:

- вероятность каждого из состояний;
- вероятность безотказной работы (отказа) на заданном интервале времени;
- вероятность застать систему в заданный момент времени в работоспособном подмножестве состояний (коэффициент готовности);
- средняя наработка на отказ;
- средняя наработка до отказа;
- среднее время восстановления;
- параметр потока отказов;
- средняя эффективность (производительность) в заданный момент времени;
- средняя интегральная эффективность на заданном интервале времени.

Модуль содержит графический редактор, с помощью которого на экране компьютера набирается граф состояний и переходов марковского процесса. Каждой вершине и дуге задаются визуальные и вычислительные свойства. Такое задание марковского процесса намного эффективнее и нагляднее обычно применяемого заполнения инфинитезимальной матрицы.

Для создания марковского графа и проведения соответствующих расчетов необходимо выполнить следующие шаги:

1. Создать новый или открыть имеющийся файл проекта Relex (*.rj). В верхнем левом окне проекта перейти на вкладку Markov Table. С помощью команды системного меню Insert/New Markov Diagram создать новый марковский граф и вставить новую запись в таблицу. Ввести в строку таблицы имя и описание создаваемого графа.
2. Набрать блок-схему с помощью операций вставки состояний (Insert/State или Ctrl+G) и соединить состояния в соответствии с логикой переходов системы. Соединение осуществляется щелчком мыши на выбранном состоянии (вершине графа) и ведением (при нажатой левой клавиши мыши) возникшей соединительной линии (дуги графа) до нужного состояния. При организации соединений необходимо помнить, что дуги входят/выходят только в специальные маленькие треугольники, обрамляющие эллипсы состояний. При работе с визуальным редактором можно пользоваться многоуровневой командой Undo (Ctrl+Z или кнопка на панели инструментов), командами перемещения, выделения, удаления, копирования, вырезки, вставки дуг и вершин графа.
3. Настроить визуальные свойства вершин. Для этого при выделенной вершине нажимается правая клавиша мыши и из всплывающего меню выбирается пункт "Visual Properties". На вкладках появившейся диалоговой панели General, Text, Graphic, Size, Color, Text Display настраиваются цвет, форма и размер вершин, содержание и форматы надписей.
4. Настроить расчетные свойства вершин. Для этого при выделенной вершине нажимается правая клавиша мыши и из всплывающего меню выбирается пункт "Calculation Properties". На вкладках появившейся диалоговой панели настраиваются расчетные свойства:
 - State – тип состояния (работоспособное, отказовое, деградация);
 - Initial Condition - начальное условие (0÷1);
 - Cost - доход (убыток) за единицу времени пребывания в данном состоянии.
5. Настроить визуальные свойства соединений (дуг). Для этого при выделенной дуге нажимается правая клавиша мыши и из всплывающего меню выбирается пункт "Visual Properties". На вкладках появившейся диалоговой панели настраиваются визуальные свойства (толщина, стиль, цвет дуги, формат надписи).
6. Настроить расчетные свойства соединений (дуг). Для этого при выделенной дуге нажимается правая клавиша мыши и из всплывающего меню выбирается пункт "Calculation Properties". На вкладках появившейся диалоговой панели настраиваются расчетные свойства:
 - Rate - интенсивность перехода;
 - Cost per Transition – доход (штраф) за переход в состояние.
7. Провести расчеты надежности и эффективности. Для этого необходимо:
 - Выбрать пункт системного меню Project/Calculate, на появившейся панели многостраничного диалога выбрать вкладку Calculation Selection (Выбор Расчета) и поставить галочку в окошке выбора, соответствующем Markov.
 - На вкладке Markov задать интервал времени и количество промежуточных точек, на которых выводятся результаты вычислений, определить требуемую точность расчетов. Здесь же формируется набор вычисляемых показателей безотказности, готовности, эффективности.
 - Нажать кнопку ОК для запуска вычислений. Результаты расчета по системе в целом можно просмотреть, выбрав пункт системного меню View/Markov Calculation Results. Значений показателей по состояниям приводятся на вкладке Calculation Properties/Result.
8. Создать отчеты нужного формата с помощью Мастера Отчетов (File/Print Preview).

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"

1.2.1. Содержание этапов ОЛВМ

Теоретической основой технологии автоматизированного структурно-логического моделирования является *общий логико-вероятностный метод* (ОЛВМ) моделирования и расчета надежности, живучести и безопасности структурно и качественно сложных системных объектов и процессов [3-5]. В ОЛВМ расчета надежности аппарат математической логики используется для первичного графического и аналитического описания условий реализации функций отдельными и группами элементов в проектируемой системе, а методы теории вероятностей и комбинаторики применяются для количественной оценки безотказности и/или опасности функционирования проектируемой системы в целом. Для использования ОЛВМ должны задаваться специальные структурные схемы функциональной целостности исследуемых систем, логические критерии их функционирования, вероятностные и другие параметры элементов.

В основе постановки и решения всех задач моделирования и расчета надежности систем с помощью ОЛВМ лежит так называемый событийно-логический подход. Этот подход предусматривает последовательное выполнение следующих четырех основных этапов ОЛВМ:

1. Этап структурно-логической постановки задачи, который включает в себя:
 - разделение всей рассматриваемой системы на конечное число H элементов $i = 1, 2, \dots, H$, каждый из которых представляется в модели надежности простым (бинарным) событием x_i с двумя возможными состояниями $\bar{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$, например, работоспособности/отказа, готовности/неготовности, поражения/не поражения и т.п. и заданными вероятностными параметрами $p_i(t)$, или $q_i(t) = 1 - p_i(t)$;
 - определение содержания и логических условий реализации y_i и/или не реализации \bar{y}_i выходных функций для каждого элемента в системе;
 - логически строгое вербальное и графическое (аналитическое) описание множества X отдельных элементов системы и множества условий Y реализации ими своих системных функций, которые в совокупности $G(X, Y)$ образуют специальную *схему функциональной целостности* (СФЦ) рассматриваемой системы;
 - логически строгое описание и задание с помощью отдельных или групповых выходных функций *логических критериев функционирования* (ЛКФ) системы $Y_F = Y_F(\{y_i\}, i = 1, 2, \dots, N)$ реализации основных функций и/или возникновения опасных состояний системы.
2. Этап логического моделирования, на котором с помощью специальных методов преобразования СФЦ и ЛКФ осуществляется построение логической *функции работоспособности системы* (ФРС) $Y_F = Y_F(\{\bar{x}_i\}, i = 1, 2, \dots, H)$. Логическая ФРС позволяет аналитически строго в компактной форме определить все комбинации состояний элементов $\bar{x}_i, i = 1, 2, \dots, H$, в которых (и только в которых) система реализует свою выходную функцию F .
3. Этап вероятностного моделирования, на котором с помощью специальных методов преобразования ФРС осуществляется построение многочлена расчетной *вероятност-*

ной функции (ВФ) $P_F(\{p_i(t), q_i(t)\}, i = 1, 2, \dots, H; t)$. Многочлен ВФ позволяет аналитически строго определить закон распределения времени безотказной работы системы по реализации выходной функции F , заданной логическим критерием функционирования.

4. Этап выполнения расчетов показателей надежности, которые выполняются на основе ВФ и заданных параметров надежности элементов.

В технологии автоматизированного структурно-логического моделирования вручную выполняется только первый этап структурно-логической постановки задач оценки надежности, безопасности и риска сложных систем. Этапы построения логических ФРС, многочленов ВФ и расчетов показателей выполняются с помощью специальных программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ) [6-11, 19].

Главную творческую работу по постановке задачи и анализу результатов проектного расчета надежности выполняют проектировщик и системный аналитик. Они логически описывают проектируемую систему, строят СФЦ для каждой из ее главных подсистем и функций, определяют параметры надежности элементов, задают логические критерии реализации функций, анализируют результаты расчетов, вырабатывают и реализуют проектные решения и подготавливают отчет.

Вся громоздкая и трудоемкая работа по построению логических, расчетных математических моделей и вычислению показателей надежности в технологии АСМ выполняется автоматически, с помощью специальных программных средств комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования.

1.2.1.1. Средства и методы постановки задач в ОЛВМ

Основное содержание этапа постановки задач расчета надежности проектируемой системы характеризуется схемой на рис.2.1.



Рис.2.1. Схема постановки задачи в ОЛВМ

Исходными данными для постановки задачи выступают требования ТЗ или ПОН и все знания и данные о проектируемой системе, методах, средствах и возможностях используемой технологии автоматизированного структурно-логического моделирования.

Исходные данные для постановки задачи готовит разработчик в свободной, но логически строгой форме описания организационно-технических методов и средств обеспечения надежности проектируемой системы. Оно включает в себя описание функциональной структуры системы, ее главных функций и аварийных ситуаций, состава и параметров надежности элементов. Обязательно должны быть сформулированы (текстуально и/или графически) условия, при выполнении которых каждый элемент реализует свое функциональное назначение в системе.

Окончательную формализованную постановку задачи осуществляет системный аналитик. На основе полученного от разработчика описания системы, для каждой ее функции он строит схемы функциональной целостности, задает логические критерии функционирования, фиксирует параметры надежности элементов и уточняет перечень рассчитываемых показателей надежности системы.

Главное место в постановке задач автоматизированного структурно-логического моделирования надежности занимает построение схем функциональной целостности для каждой заданной выходной функции проектируемой системы.

1.2.1.1.1 Изобразительные средства и типовые фрагменты СФЦ

Любой графический аппарат, в сущности, является языком описания структур систем. Как и все другие языки, он определяется алфавитом, синтаксисом и семантикой. Алфавит СФЦ образуют ее основные изобразительные средства, которые включают в себя два вида вершин, два вида выходов для представления исходящих ребер (дуг) и два вида входов для представления заходящих дуг.

1.2.1.1.1.1 Функциональные вершины СФЦ

Главное назначение функциональных вершин состоит в графическом обозначении прямых исходов бинарных событий $\bar{x}_i = x_i$, которыми в СФЦ представляются элементы i исследуемой системы. На рис.2.2 приведено графическое представление и аналитическое описание функциональной вершины.



$i \in \mathbb{N}$ - номер функциональной вершины (элементов, событий);

$\bar{x}_i = x_i$ - свершение собственного, элементарного события;

$p_i(t)$ - вероятность свершения собственного элементарного события i .

Рис.2.2. Обозначение функциональной вершины в СФЦ

Примерами событий, представляемых функциональными вершинами в структурных схемах систем могут быть:

- сохранение работоспособности технического средства в течение заданного времени его работы (наработки);
- отказ технического средства в любой момент заданного времени работы;
- принятие (или не принятие) некоторого решения на определенном этапе процесса управления системой;
- правильное выполнение заданной функции (или ошибка) оператора на заданном этапе управления системой;
- выполнение (или не выполнение) заданной функции данным техническим средством или подсистемой;
- поражение (или не поражение) объекта в результате возникновения аварийной ситуации или вредного воздействия и др.

1.2.1.1.1.2 Дизъюнктивные ребра (дуги) в СФЦ

Направленность дизъюнктивных ребер в СФЦ обозначается стрелками. Вершина, из которой дуга исходит, называется *обеспечивающей*, а вершина, в которую дуга заходит, – *обеспечиваемой*.

Дизъюнктивные ребра (дуги) в СФЦ предназначены для графического отображения следующих двух видов информации:

а) дуга, исходящая из вершины i , обозначается y_i (прямая выходная дуга) и представляет все условия, необходимые для реализации (выполнения) выходной функции этого элемента;

б) дуга y_j , исходящая из вершины j и заходящая в вершину i , обозначает одно из условий обеспечения реализации выходной функции y_i .

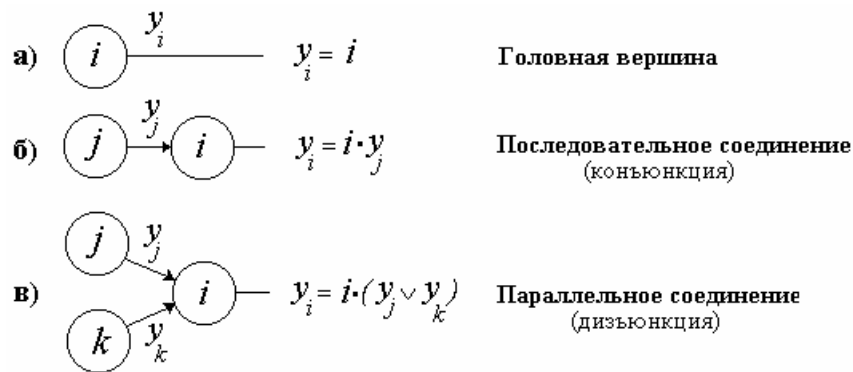


Рис.2.3. Типовые варианты использования дизъюнктивных дуг в СФЦ

Вариант структурной схемы на рис.2.3.а представляет вершину без заходящих в нее дуг (без обеспечения). Такие вершины называют *головными*. Элементы систем, представляемые в СФЦ головными вершинами, считаются достоверно обеспеченными. Это значит, что условия реализации прямой выходной функции y_i головной вершины определяется свершением только собственного события x_i . Аналитически такое условие определяется следующим логическим уравнением:

$$y_i = x_i \quad (1.2.1)$$

Схема на рис.2.3.б представляет одиночную связь функционального подчинения элемента i элементу j . Это означает, что прямая выходная функция y_i элемента i реализуется, если свершилось собственное событие x_i и реализована обеспечивающая функция y_j элемента j . Логическое уравнение в этом случае имеет вид

$$y_i = x_i \cdot y_j \quad (1.2.2)$$

Одиночная связь функционального подчинения в СФЦ эквивалентна последовательному соединению вершин в графах связности и деревьях событий.

Последняя схема, изображенная на рис.2.3.в., представляет условия дублированного (резервированного, дизъюнктивного) обеспечения элемента i системы хотя бы одной из двух интегративных функций y_j или y_k . Говорят, что между функциями y_j и y_k в системе реализованы дизъюнктивные (логическая операция "ИЛИ") организационные отношения. Логическое уравнение, соответствующее рис.П.3.в, имеет вид:

$$y_i = x_i \cdot (y_j \vee y_k) \quad (1.2.3)$$

Дизъюнктивные организационные отношения в СФЦ являются аналогами известных параллельных соединений элементов в графах связности.

Рассмотренные изобразительные средства и логические уравнения представляют все графические и логические возможности деревьев событий и графов связности, которые нашли широкое применение в известных структурных методах анализа надежности систем. Вместе с тем, аппарат СФЦ обладает рядом новых дополнительных возможностей. Они позволяют строить модели надежности систем со сложной логической организацией работы элементов.

1.2.1.1.1.3 Фиктивные вершины в СФЦ

В отличие от функциональных фиктивные вершины не представляют никаких элементов моделируемой системы и служат только для расширения возможностей графического представления сложных логических связей и отношений между различными интегративными функциями.

$$\varphi \bigcirc \quad \begin{array}{l} x_{\varphi} = I \quad - \text{логическая единица, истина;} \\ p_{\varphi} = 1 \quad - \text{достоверное событие.} \end{array}$$

Рис.2.4. Обозначение фиктивной вершины в СФЦ

Собственно фиктивная вершина φ в СФЦ рассматривается как логическая константа **I** (истина), т.е. некоторое условное, достоверное событие, вероятность реализации которого $p_{\varphi}(t)$ принимается равной единице. В общем логико-вероятностном методе фиктивные вершины имеют следующее аналитическое определение.

$$x_{\varphi} = \mathbf{I} \text{ (истина); } p_{\varphi}(t) = p_{\varphi} = 1; \quad \overline{x_{\varphi}} = \mathbf{O} \text{ (ложь); } q_{\varphi}(t) = q_{\varphi} = 0 \quad (1.2.4)$$

Примеры использования фиктивных вершин в СФЦ приведены на рис.2.5.

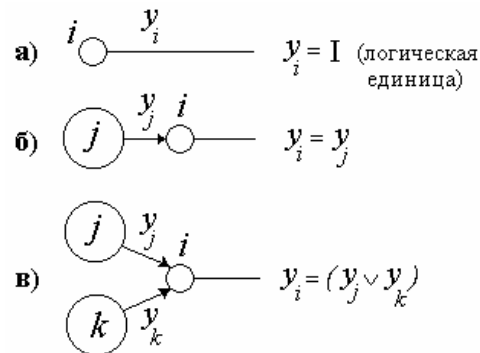


Рис.2.5. Типовые варианты использования фиктивных вершин в СФЦ

Из сравнения рис.2.5. и рис.2.3. следует, что логические уравнения выходных интегративных функций для фиктивных вершин отличаются от аналогичных уравнений для функциональных вершин только отсутствием в записи обозначений простых логических переменных x_i .

Фиктивные вершины в СФЦ являются аналогами точечных соединений дуг или логических объединений ребер, применяемых в графах связности и деревьях событий.

Введенные графические и аналитические обозначения фиктивных вершин позволяют использовать их в СФЦ совместно с функциональными вершинами, с сохранением всех правил логического и вероятностного моделирования.

Рассмотренных графических средств СФЦ достаточно, чтобы успешно решать все задачи расчета надежности систем, функционирование которых представляется последовательно-параллельными и мостиковыми графами связности.

1.2.1.1.1.4 Конъюнктивные дуги в СФЦ

Конъюнктивные дуги используются в СФЦ наравне с дизъюнктивными дугами (см.рис.2.3). Однако направленность связей логического подчинения на концах конъюнктивных дуг обозначается не стрелками, а точками. С помощью конъюнктивных дуг в СФЦ пред-

ставляются условия, когда элементы параллельных ветвей не дублируют (не резервируют) друг друга, а должны функционировать все вместе, одновременно.

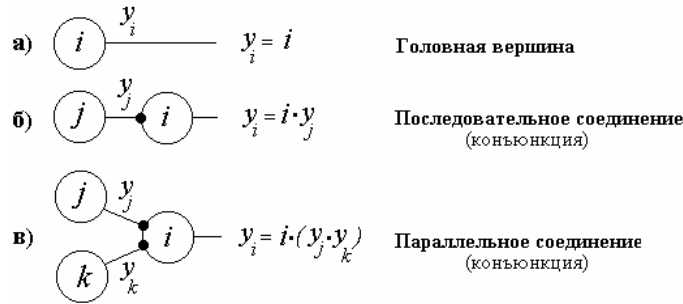


Рис.2.6. Типовые варианты использования конъюнктивных дуг в СФЦ

Сравнивая рис.2.6. и рис.2.3 видим, что, по определению, головные вершины и последовательные соединения, изображенные в СФЦ с помощью одиночных дизъюнктивных и одиночных конъюнктивных дуг, являются совершенно одинаковыми как в логическом, так и в вероятностном смысле.

Главное назначение конъюнктивных дуг в СФЦ состоит в обеспечении возможности корректного учета зависимостей, требующих одновременного функционирования нескольких параллельных элементов, ветвей или подсистем структурной схемы. Так логическое условие реализации выходной функции (y_i) схемы, изображенной на рис.2.6.в, состоит в одновременной реализации функций (y_j и y_k), двух разных элементов j и k , что не могло быть представлено раньше с помощью графов связности.

$$y_i = x_i \cdot (y_j \cdot y_k) \quad (1.2.5)$$

Конъюнктивные дуги в СФЦ позволяют иным, чем последовательное соединение, способом представить условия одновременной (конъюнктивной) реализации нескольких обеспечивающих функций в системе.

1.2.1.1.2 Использование дизъюнктивных и конъюнктивных дуг в СФЦ

Важное место в СФЦ занимают приемы представления сложных смешанных организационных отношений между несколькими обеспечивающими функциями вершин. В этом случае обеспечение элемента i определяется реализацией одновременно нескольких дизъюнктивных и конъюнктивных условий. Обобщенный вариант монотонной схемы такого смешанного фрагмента обеспечения в СФЦ изображен на рис.2.7.

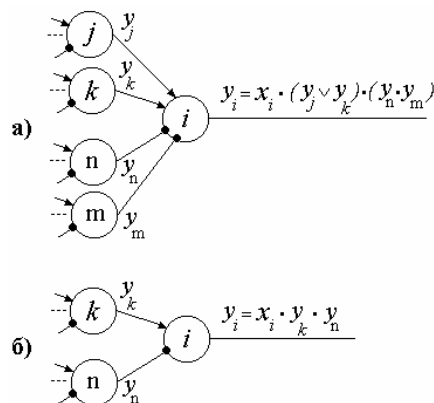


Рис.2.7. Варианты смешанного обеспечения вершин СФЦ

СФЦ на рис.2.7.а представляет фрагмент системы, где, например, исполнительный элемент i обеспечивается тремя видами ресурсов:

j, k - электроэнергией;

n - водой;

m - воздухом.

Условия обеспечения элемента i воздухом y_m и водой y_n не резервированы, а обеспечение электроэнергией осуществляется от двух дублированных источников y_j или y_k .

Следует отметить, что в смешанных организационных отношениях между группами дизъюнктивных и группами конъюнктивных заходящих дуг всегда устанавливается знак логического умножения (знак конъюнкции). Это означает, что общая функция смешанного обеспечения реализуется, если имеются одновременно - все без исключения функции конъюнктивной группы и хотя бы одна функция дизъюнктивной группы. Полезно осмыслить один вырожденный, частный случай смешанного обеспечения, СФЦ которого приведена на рис.2.7.б. Здесь присутствуют две одиночные заходящие дуги, обеспечивающие элемент i , одна дизъюнктивная y_k и одна конъюнктивная y_n . По правилам построения СФЦ между этими функциями в логическом уравнении записывается знак логического умножения.

1.2.1.1.3 Размножение функциональных вершин

Многие элементы в современных технических и организационных системах являются функционально сложными, т.е. могут выполнять (или не выполнять) не одну, а сразу несколько различных функций. Для реализации каждой из этих функций может потребоваться разное по составу и организации обеспечение. При этом отказ такого многофункционального элемента приводит к отказу реализации всего множества его различных выходных функций.

Деревьями событий и графами связности такие многофункциональные элементы не представляются. Для учета многофункциональных элементов в СФЦ реализована возможность размноженного представления (размножения) функциональных вершин. То есть, в СФЦ разрешается отображение одного многофункционального элемента системы с помощью нескольких размноженных функциональных вершин. Число размноженных вершин обычно равно числу разных функций данного элемента, различные условия реализации которых должны быть представлены в СФЦ.

Размноженные вершины должны иметь в СФЦ разные схемные номера. Эти номера объединяются в группу, которой сопоставляется один общий системный номер и параметр одного данного события. Типовая запись группы размноженных вершин следующая:

$$\{i, j, k, m, n\} = i, \quad p_i \quad (1.2.6)$$

В этой группе номер i является основным, системным. Он определяет индекс одного случайного события x_i безотказной работы многофункционального элемента и его вероятностного параметра p_i . Все остальные номера j, k, m, n группы являются дополнительными, схемными и определяют в СФЦ вершины, размноженные по разным функциям данного элемента i . Однако, все эти номера и вершины представляют с СФЦ одно единственное простое событие x_i с собственным вероятностным параметром p_i .

В одной СФЦ может быть несколько групп размноженных функциональных вершин. Вся информация о таких группах записывается отдельно от схемы в форме (1.2.6).

1.2.1.1.4 Представление логической операции инверсирования в СФЦ

Для реализации в ОЛВМ всех возможностей основного аппарата моделирования алгебры логики в СФЦ предусмотрена возможность графического представления логической

операции "НЕ" (инверсирования). Таким образом, набор логических операций, графически представляемых в СФЦ, является функционально полным ("И", "ИЛИ", "НЕ").

Графическое отображение логической операции инверсирования реализовано с помощью еще одного, второго вида выхода дуги из вершин СФЦ, который назван инверсным выходом. Этот выход можно отображать на любой функциональной, фиктивной или размноженной вершине. Типовые примеры изображения инверсных выходов вершин в СФЦ приведены на рис.2.8.

СФЦ на рис.2.8.а отличается от СФЦ на рис.2.7.а наличием второго инверсного выхода \bar{y}_i функциональной вершины i . По смысловому содержанию инверсный выход является точной логической противоположностью прямого выхода из вершины, который применялся во всех ранее рассмотренных структурных схемах. Например, если прямой выход используется для обозначения условия работоспособности или безопасности системы, то инверсный выход точно и однозначно представляет условия неработоспособности этой системы или условия возникновения аварийной ситуации.

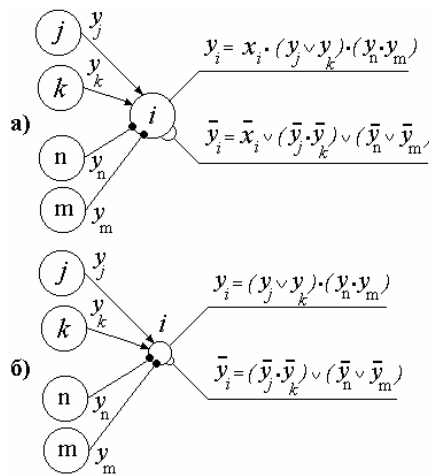


Рис.2.8. Примеры изображения инверсных выходов в СФЦ

На рис.2.8.б приведено изображение и логическое уравнение инверсного выхода из фиктивной вершины СФЦ.

1.2.1.1.5 Обобщенный структурный фрагмент СФЦ

Рассмотренные выше изобразительные средства СФЦ (см. рис.2.2-2.8 и выражения (2.1-2.5)), можно представить одним обобщенным структурным фрагментом и двумя базовыми аналитическими соотношениями (логическими уравнениями). Схема обобщенного структурного фрагмента СФЦ приведена на рис.2.9.

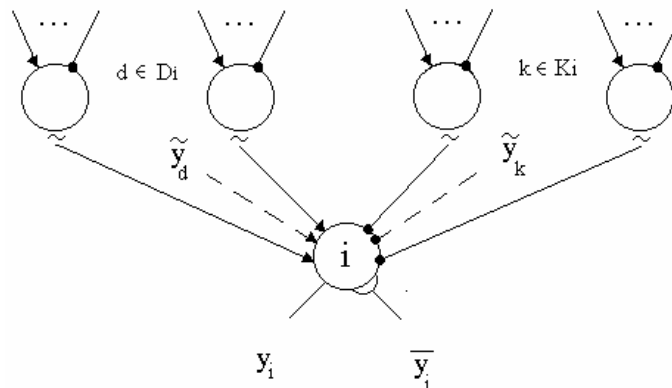


Рис.2.9. Схема обобщенного фрагмента СФЦ

На рис.2.9. в обобщенном виде представлены все рассмотренные выше типовые фрагменты СФЦ. Обеспечивающие вершины разделены на две группы - дизъюнктивную и конъюнктивную. Номера d обеспечивающих вершин дизъюнктивной группы составляют множество D_i , а номера k обеспечивающих вершин конъюнктивной группы составляют множество K_i . С помощью знака "тильда" на схеме обозначена возможность использования в СФЦ любого из двух возможных выходов обеспечивающих вершин - прямого или инверсного. Знаком тильды отмечены и выходные интегративные функции обеспечивающих вершин, которые также могут быть прямыми или инверсными

$$\tilde{Y}_d = \{y_d, \bar{y}_d\}; \quad (1.2.7)$$

$$\tilde{Y}_k = \{y_k, \bar{y}_k\};$$

С учетом принятых обозначений интегративные функции прямого и инверсного выходов вершины i обобщенного фрагмента СФЦ определяются следующими универсальными, базовыми логическими уравнениями.

Для прямой выходной интегративной функции

$$а). y_i = i \cdot \left(\bigvee_{d \in D_i} \tilde{Y}_d \right) \cdot \left(\big\& \tilde{Y}_k \right), \quad i - \text{функциональная вершина} \quad (1.2.8)$$

$$в). y_i = \left(\bigvee_{d \in D_i} \tilde{Y}_d \right) \cdot \left(\big\& \tilde{Y}_k \right), \quad i - \text{фиктивная вершина}$$

Для инверсной выходной интегративной функции

$$а). \bar{y}_i = \bar{i} \vee \left(\big\& \bar{\tilde{Y}}_d \right) \vee \left(\bigvee_{k \in K_i} \bar{\tilde{Y}}_k \right), \quad i - \text{функциональная вершина} \quad (1.2.9)$$

$$в). \bar{y}_i = \left(\big\& \bar{\tilde{Y}}_d \right) \vee \left(\bigvee_{k \in K_i} \bar{\tilde{Y}}_k \right), \quad i - \text{фиктивная вершина}$$

Выражения (2.8.а) и (2.9.а) определяют случай, когда вершина i функциональная, а (2.8.б) и (2.9.б), когда вершина i фиктивная (см. рис.2.4.).

В базовых аналитических уравнениях части, выделенные круглыми скобками, называют, соответственно, дизъюнктивной и конъюнктивной группами составляющих функции обеспечения (ФО) вершины i . В дизъюнктивные группы объединены выходные интегративные функции \tilde{Y}_d тех вершин (множество номеров $d \in D_i$), которые обеспечивают реализацию прямого выхода y_i вершины i по логике "ИЛИ", а в конъюнктивные группы объединены выходные интегративные функции \tilde{Y}_k тех вершин (множество номеров $k \in K_i$), которые обеспечивают реализацию прямого выхода y_i вершины i по логике "И".

Из (1.2.8) и (1.2.9) могут быть легко получены все рассмотренные выше частные фрагменты СФЦ и базовых логических соотношений. Например, если вершина i функциональная и в схеме ее обеспечения отсутствует (равна логической единице **1**) конъюнктивная часть ФО (в схеме нет заходящих дуг с точками), то (2.8.а) точно представляет аппарат графов связности (см. выражения (1.2.1)- (1.2.3)).

Если в схеме отсутствует дизъюнктивная часть ФО (нет заходящих дуг со стрелками), то из (2.8.а) получаем все типовые варианты использования конъюнктивных дуг в СФЦ (см. выражение (1.2.5)). Отсутствие в записях функций (1.2.8) и (1.2.9) всей ФО определяет головную (функциональную или фиктивную) вершину в СФЦ.

1.2.1.2. Методика построения СФЦ

1.2.1.2.1 Общие замечания и рекомендации

Построение схемы функциональной целостности является основой постановки задач проектного анализа надежности и безопасности систем. Как и любая другая постановочная

задача, построение СФЦ, в своей главной содержательной части, является сугубо творческим, неформальным и, следовательно, абсолютно не алгоритмизируемым процессом. Постановку задачи проектного расчета надежности могут осуществлять профессиональные специалисты двух предметных областей, работающие совместно:

- разработчики (работники проектных отделов) и/или пользователи (заказчики), создающие и эксплуатирующие системные объекты и получившие подготовку по основам технологии автоматизированного структурно-логического моделирования;
- системные аналитики (обычно работники исследовательских отделов), профессионально владеющие технологией автоматизированного структурно-логического моделирования.

При построении СФЦ разработчик осуществляет идентификацию и предварительное общее, но логически строгое, описание условий реализации функций каждым элементом и исследуемой системой в целом. Системный аналитик выполняет окончательное строго формальное построение СФЦ по каждой функции проектируемой системы. После согласования этих СФЦ с разработчиком они используются в проектном расчете надежности системы.

При логическом описании и построении СФЦ необходимо учитывать ограничения и допущения, принятые в ОЛВМ моделирования и расчета надежности систем. Типовые допущения и ограничения следующие:

- бинарность, то есть возможность находиться только в двух несовместных состояниях, случайных событий $\bar{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$, с помощью которых представляются (моделируются) элементы $i = 1, 2, \dots, N$ системы;
- независимость в совокупности всех выделенных бинарных событий, которая означает, что собственные вероятностные параметры надежности $p_i(t)$ соответствующих элементов не изменяется в зависимости от того, отказали или не отказали другие элементы системы;
- неограниченность процессов восстановления элементов в моделях надежности восстанавливаемых систем, которая означает, что интенсивность ремонтных работ любого элемента не зависит от того, сколько элементов системы уже ремонтируется;
- в моделях надежности законы распределения случайного времени безотказной работы и восстановления всех элементов принимаются экспоненциальными;
- статистическая устойчивость вероятностных характеристик элементов, которая означает, что на рассматриваемом интервале времени работы системы собственные исходные параметры законов распределений элементов не изменяются.

Указанные допущения и ограничения свойственны большинству известных методик расчета надежности. В технологии АСМ эти ограничения и допущения не являются абсолютными и характеризуют только типовой набор средств для проектного расчета надежности и безопасности объектов. При необходимости, многие из ограничений могут быть сняты путем совершенствования теории и адаптации технологических средств АСМ к конкретному классу задач проектной оценки надежности систем.

1.2.1.2.2 Основные этапы построения СФЦ

1. Выделение в проектируемой системе конечного числа элементов, которые в модели надежности представляются бинарными событиями, а в СФЦ функциональными вершинами. При этом следует учитывать следующие рекомендации:

- Каждый выделенный элемент примерно в два раза увеличивает расчетную модель надежности системы. Поэтому число элементов не следует делать очень большим. Вместе с тем, недостаточное число элементов может привести к недопустимому снижению точности модели и проектной оценки надежности системы. Искусство выделения дос-

таточного числа элементов определяется опытом разработчиков и постоянным сравнительным анализом различных вариантов. Для ориентировки можно сообщить, что последние проектные расчеты надежности содержали в структурных моделях систем от нескольких десятков до одной - двух сотен элементов.

- Все выделенные элементы должны иметь наименования, соответствующие реальным объектам проектируемой системы. Одновременно, в логических описаниях элементов и вершин СФЦ должно быть четко и однозначно определено смысловое содержание каждого из двух состояний (несовместных исходов) всех бинарных событий.
- Выделение бинарных событий должно соответствовать указанным выше допущениям и ограничениям ОЛВМ моделирования и расчета надежности. Приемы и способы снятия каких-либо из этих допущений в отчетных материалах описываются отдельно.
- Для учета в моделях надежности многофункциональных элементов или подсистем выделяются группы размноженных функциональных вершин СФЦ и устанавливается соответствие их схемных и системных номеров вида (1.2.6).
- Все выделяемые бинарные события должны быть параметрически определяемыми. То есть должна быть обеспечена возможность обоснованного задания (нахождения, определения, вычисления и др.) числовых значений собственных вероятностных параметров надежности каждого элемента.
- Для каждой функции системы и/или варианта аварийной ситуации (если они заданы) выделяется набор (подмножество) необходимых бинарных событий. Затем для каждой функции (аварийной ситуации) разрабатывается логически строгое описание условий реализации системных функций элементами и соответствующий граф $G(X, Y)$ схемы функциональной целостности. При выполнении этой работы полезно учитывать следующие рекомендации:

Для каждого выделенного бинарного события x_i определяются:

а). смысловое содержание выходной функции y_i соответствующего элемента i в системе;

б). все логические условия реализации этой выходной функции в системе, сформулированные в терминах собственного события x_i и обеспечивающих функций y_j, y_k, \dots других элементов системы.

- Для представления сложных логических отношений и для повышения наглядности, в описание структуры системы могут вводиться фиктивные вершины, на которых осуществляется необходимая группировка логических условий.
- Главный критерий описания и построения СФЦ заключается в том, чтобы логически определить и графическими средствами СФЦ изобразить все условия реализации в системе прямых выходных функций каждой выделенной функциональной и каждой введенной фиктивной вершиной. После этого построение структурной модели $G(X, Y)$ считается законченным.
- Каждое законченное логическое описание и соответствующая СФЦ могут представлять одну или сразу несколько функций (или аварийных ситуаций). Поэтому для выполнения следующих этапов моделирования и расчета надежности необходимо задать один или сразу несколько логических критериев функционирования системы. Как описание ЛКФ представляет собой высказывание, в котором с помощью выходных функций $y_i, i = 1, 2, \dots, N$ одного или нескольких элементов задается условие функционирования всей системы. Аналитически ЛКФ представляет собой булеву функцию следующего вида:

$$Y_F = f(\{y_i\}, i = 1, 2, \dots, N) \quad (1.2.10)$$

Здесь F определяет номер функции (номер вида аварийной ситуации) системы, а N - общее число функциональных, размноженных и фиктивных вершин СФЦ.

2. Проверка полноты и правильности построения СФЦ и задания ЛКФ. Такая проверка должна выполняться постоянно в процессе проектного расчета надежности. Она предусматривает многократное, порой итерационное повторения всех этапов построения СФЦ, в целях ее уточнения, исправления, расширения и проверки.

1.2.1.2.3 Задание логических критериев и параметров элементов

После построения СФЦ, на завершающем этапе постановки задачи расчета надежности проектируемой системы, определяются параметры надежности элементов и логические критерии ее функционирования.

1.2.1.3. Средства и методы построения математических моделей

Проектный расчет надежности с помощью технологии АСМ предусматривает последовательное построение двух видов расчетных моделей:

- логической функции работоспособности системы

$$Y_F = Y_F(\{\bar{x}_i\}, i = 1, 2, \dots, H);$$

- многочлена расчетной вероятностной функции

$$P_F(t) = p_F(\{p_i(t), q_i(t)\}, i = 1, 2, \dots, H; t).$$

1.2.1.3.1 Построение логических функций работоспособности систем

В качестве логической модели надежности системы используется булева функция, которую называют логической функцией работоспособности системы (ФРС). Логическая ФРС представляет множество состояний, в которых система реализует соответствующий критерий своего функционирования. Это множество иногда называют областью состояний работоспособности системы. Однако в ОЛВМ понятие логической ФРС принято толковать расширенно, как логическая форма представления тех состояний системы, в которых (и только в которых) реализуется заданный критерий ее функционирования. При этом, собственно логический критерий может определять самые разные свойства системы - работоспособность, неработоспособность, живучесть, безопасность, уровень эффективности, риск, готовность, неготовность и т.д.

На рис.2.10. изображена общая схема задачи определения логической ФРС. Исходными данными здесь являются СФЦ и ЛКФ системы.



Рис.2.10. Схема задачи определения логической ФРС

В основе процедуры определения логических ФРС лежат специальные методы и программные средства решения систем логических уравнений (СФЦ) для каждого заданного ЛКФ системы. Аппарат СФЦ и метод, алгоритм и программа определения монотонных и немонотонных ФРС являются единым целым и составляют основу ОЛВМ, технологии и всех программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования систем (авторы и правообладатели Можаяев А.С. и Гладкова И.А. [10, 11]).

1.2.1.3.2 Построение многочленов вероятностных функций

В качестве расчетной вероятностной модели надежности системы используется многочлен вероятностной функции $P_F(t) = p_F(\{p_i(t), q_i(t)\}, i = \overline{1, 2, \dots, H}; t)$, который должен точно определять (в рамках принятых ограничений и допущений) закон распределения времени безотказной работы системы, все состояния работоспособности которой представлены с помощью логической ФРС $Y_F = Y_F(\{\bar{x}_i\}, i = \overline{1, 2, \dots, H})$.

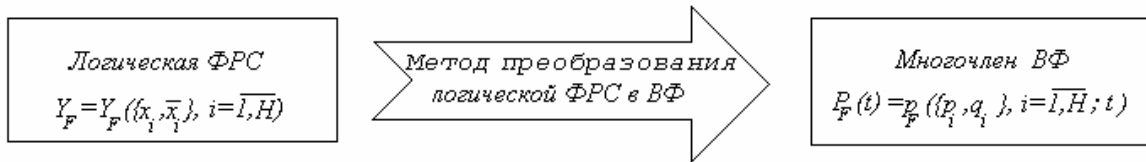


Рис.2.11. Схема задачи определения ВФ

Параметрами $p_i(t), q_i(t) = 1 - p_i(t)$ многочлена ВФ являются, в простейшем случае, собственные вероятности безотказной работы или коэффициенты готовности отдельных элементов системы. В общем случае, это законы распределения времени безотказной работы всех элементов проектируемой системы.

В настоящее время разработано большое количество методов преобразования логических ФРС в ВФ. Все они характеризуются высокой громоздкостью и трудоемкостью процедур перехода, и их практическое применение возможно только при полной автоматизации. В ПК АСМ реализованы два метода:

1. Комбинированный метод, алгоритм и программа преобразования логических ФРС в многочлены ВФ (автор Можяев А.С.) [3-11];
2. Метод, алгоритм и программа ортогонализации логической ФРС (автор Татусьян О.В.) [19].

1.2.1.4. Методы вычисления показателей надежности и безопасности систем

Обобщенная схема завершающего четвертого этапа проектного расчета надежности приведена на рис.2.12.

В правой части схемы приведены типовые показатели надежности, вычисление которых предусмотрено требованиями государственных стандартов и руководящих документов по надежности автоматизированных систем управления. В технологии АСМ расчет указанных показателей выполняется на основе многочленов вероятностных функций, параметров надежности элементов и инверсированных логических функций работоспособности, представляющих все минимальные сечения отказов по каждой функции по проектируемой системе в целом.



Рис.2.12. Схема задачи вычисления показателей надежности

1.2.1.4.1 Расчет безотказности невосстанавливаемых систем

Справка. Невосстанавливаемыми называют системные объекты, в которых на рассматриваемом интервале времени t функционирования все элементы $i=1,2,\dots,H$ могут независимо отказывать, с интенсивностью T_{oi} , но ни один из этих элементов после отказа не восстанавливается.

1.2.1.4.1.1 Расчет вероятности безотказной работы невосстанавливаемой системы

Исходными данными для расчета этого показателя являются:

- многочлен $P_F(t)$ вероятностной функции рассматриваемого режима F функционирования исследуемой системы

$$P_F(t) = p_F(\{p_i(t), q_i(t)\}, i = 1, 2, \dots, H; t) \quad (1.2.11)$$

- числовые значения средней наработки до отказа T_{oi} всех элементов системы в годах;
- требуемое время t функционирования системы (наработка системы).

Сначала выполняется расчет вероятностей безотказной работы и отказа элементов системы для экспоненциального закона распределения времени их безотказной работы

$$\begin{aligned} p_i(t) &= e^{-\frac{t}{T_{oi}}}; \\ q_i(t) &= 1 - p_i(t). \end{aligned} \quad (1.2.12)$$

Подставляя аналитические выражения (1.2.12) в многочлен ВФ получаем закон распределения времени безотказной работы системы по реализации функции F . На основе этого закона выполняются расчеты вероятности безотказной работы системы для заданной наработки t .

Следует отметить, что при условии независимости отказов элементов подобная подстановка возможна не только для экспоненциального, но и для любых других законов распределения времени безотказной работы элементов, если вид и параметры этого закона известны. Причем, эти законы могут быть разными для различных элементов рассматриваемой системы в целом.

1.2.1.4.1.2 Расчет средней наработки до отказа

Аналитическое решение этой задачи связано с нахождением интеграла от многочлена (1.2.13) вероятностной функции надежности системы:

$$T_{oF} = \int_0^{\infty} P_{oF}(t) dt; \quad (1.2.13)$$

Если многочлен (1.2.11) представить в прямой форме без использования параметра $q_i(t)$ (заменив его на $1 - p_i(t)$), то интеграл (1.2.13) для экспоненциального закона берется непосредственно, в общем виде, и соответствующая расчетная формула средней наработки до первого отказа составляет

$$T_{oF} = \sum_{j=1}^M (zn_j) \frac{1}{\sum_{i \in K_j} \frac{1}{T_{oi}}} \quad (1.2.14)$$

Здесь M - число одночленов в преобразованном многочлене ВФ, (zn_j) - знак перед j -ым одночленом, а K_j - множество номеров элементов i , параметры $p_i(t)$ которых вошли в j -ый одночлен.

1.2.1.4.2 Расчет безотказности восстанавливаемых систем

Справка. Восстанавливаемыми называют системы, в которых все элементы, $i = 1, 2, \dots, H$, могут независимо отказывать с заданной интенсивностью $\lambda_i(t) = \lambda_i = const$, и неограниченно восстанавливаться, т.е. переходить в состояние работоспособности, с заданной интенсивностью восстановления $\mu_i(t) = \mu_i = const$.

1.2.1.4.2.1 Расчет коэффициентов готовности элементов

Надежность элементов в восстанавливаемой системе характеризуется двумя параметрами

$$T_{oi} = \frac{1}{\lambda_i}; \quad T_{ei} = \frac{1}{\mu_i}. \quad (1.2.15)$$

Здесь T_{oi} - называют наработкой на отказ восстанавливаемого элемента. Оно равно среднему времени безотказной работы элемента между двумя соседними отказами. Для экспоненциального закона оно численно совпадает со средней наработкой до первого отказа восстанавливаемого элемента. Параметр T_{ei} определяет среднее время восстановления отказавшего элемента.

В качестве обобщенного исходного параметра надежности восстанавливаемого элемента может выступать его коэффициент готовности равный

$$KG_i = \frac{T_{oi}}{T_{oi} + T_{ei}} = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (1.2.16)$$

Можно говорить о следующих двух смысловых значениях коэффициента готовности. Во-первых, его значение определяет ту среднюю долю времени ($KG_i \cdot t$) из общей наработки t , в течение которой элемент является работоспособным, т.е. выполняет свои функции в системе. Остальную часть времени $(1 - KG_i) \cdot t$ элемент находится в состоянии отказа, т.е. восстанавливается. Во-вторых, коэффициент готовности равен вероятности события - застать восстанавливаемый элемент i в любой момент времени t его функционирования, в состоянии работоспособности. Аналогично, коэффициент неготовности $1 - KG_i$ равен вероятности - застать элемент в любой момент времени в состоянии неработоспособности (отказа, восстановления). Для принятых допущений эта вероятность не зависит от времени и является постоянной, на всем интервале времени функционирования объекта, кроме очень короткого начального переходного периода.

1.2.1.4.2.2 Расчет коэффициента готовности восстанавливаемой системы

Существует явное подобие в постановке и решении задач моделирования и расчета вероятности безотказной работы $P_F(t)$ невосстанавливаемой системы и коэффициента готовности KG_F той же системы, но при условии неограниченного восстановления элементов. В первой задаче вычисления $P_F(t)$ производятся с помощью многочлена ВФ, путем подстановки в него вероятностей безотказной работы $p_i = p_i(t)$ невосстанавливаемых элементов. Во второй задаче вычисления KG_F производятся с помощью того же многочлена ВФ, только в качестве параметров элементов используются коэффициенты готовности $p_i = KG_i$ восстанавливаемых элементов. Это позволяет, почти без изменений, применять методику расчета вероятности безотказной работы невосстанавливаемой системы, для определения коэффициента готовности той же, но восстанавливаемой системы.

1. Определяется многочлен функции рассматриваемого режима функционирования исследуемой системы;
2. Задаются или вычисляются значения коэффициентов готовности $p_i = KG_i$ и коэффициентов неготовности $q_i = 1 - p_i = 1 - KG_i$ всех $i = 1, 2, \dots, H$ элементов системы;

3. Эти аналитические или числовые значения параметров элементов подставляются в многочлен вероятностной функции.

В результате аналитической подстановки получается расчетная формула (расчетная математическая модель) коэффициента готовности системы.

При подстановке в ВФ числовых значений коэффициентов готовности элементов производится расчет коэффициента готовности системы в целом.

Напомним, что рассмотренная методика правомерна, если допустима гипотеза о независимости отказов и неограниченного восстановлений всех элементов системы.

1.2.1.4.2.3 Расчет средней наработки между отказами и среднего времени восстановления

Коэффициент готовности является самой распространенной, но, к сожалению, далеко не самой полной характеристикой надежности восстанавливаемой системы. Так, в частности, знание только $KГ_F$ не позволяет определить такие важные характеристики, как среднюю наработку между отказами $T_{ноF}$, среднее время восстановления $T_{вF}$ и вероятность безотказной работы $P_{вF}(t)$ восстанавливаемой системы.

В технологии АСМ для расчета указанных показателей применяются известные и новые приближенные аналитические методы [14]:

$$T_{ноF} = KГ_F * \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^H \frac{\partial KГ_F}{\partial KГ_i} * \lambda_i * KГ_i} \right) \quad (1.2.17)$$

$$T_{вF} = (1 - KГ_F) * \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^H \frac{\partial KГ_F}{\partial KГ_i} * \lambda_i * KГ_i} \right)$$

1.2.1.4.2.4 Расчет вероятности безотказной работы восстанавливаемой системы

В основе расчета этой важной характеристики лежат следующие допущения:

- вероятность безотказной работы восстанавливаемой системы характеризует событие наступления первого, даже очень кратковременного отказа системы в целом;
- случайное время до наступления первого отказа восстанавливаемой системы распределено по экспоненциальному закону с параметром

$$\lambda_{\ominus} = \frac{1}{T_{ноF} + T_{вF}}$$

Тогда, оценочный расчет вероятности первого отказа восстанавливаемой системы выполняется по известной формуле для экспоненциального закона

$$P_{вF}(t) = e^{-\lambda_{\ominus} t} = e^{-\frac{1}{T_{ноF} + T_{вF}} t} \quad (1.2.18)$$

Все рассмотренные методы расчета показателей надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем в технологии АСМ полностью автоматизированы и выполняются с помощью ПК АСМ. Это позволяет на этапе проектирования выполнять оперативный многовариантный анализ надежности высокоразмерных системных объектов произвольной структуры и организации функционирования.

1.2.1.4.2.5 Расчет значимостей и вкладов элементов

В настоящее время в технологии и ПК АСМ реализованы вычисления трех показателей роли элементов в обеспечении надежности и безопасности исследуемых систем [4, 5].

1. Значимость элементов системы

В самом общем случае показатель значимости ξ_i отдельного элемента i исследуемой системы определяется следующим соотношением

$$\xi_i = \frac{P_c}{p_i} = 1 - \frac{P_c}{p_i} = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, H \quad (1.2.19)$$

Здесь $\frac{P_c}{p_i} = 1$ - значение вероятностной характеристики системы при абсолютной надежности элемента i , а $\frac{P_c}{p_i} = 0$ - при достоверном отказе элемента i на рассматриваемом интервале t времени функционирования. Анализ определений значимости (1.2.19) позволяет заключить:

1. Величина значимости ξ_i точно равна изменению значения системной характеристики P_c вследствие изменения собственного параметра p_i от 0 до 1, и фиксированных значениях параметров всех других элементов системы.
2. Диапазон значений вероятностного показателя значимости ξ_i составляет $[-1, 0, +1]$ включительно.
3. Отрицательное значение $\xi_i < 0$ характеризует, так называемое, вредное (понижающее) влияние элемента i на вероятность реализации заданного режима работы системы. В этом случае, например, увеличение надежности самого элемента i безусловно приводит к уменьшению надежности P_c всей системы в целом, а точнее - рассматриваемого режима ее функционирования. Отрицательные значимости элементов характерны для немонотонных логико-вероятностных моделей систем.
4. Нулевое значение характеристики значимости $\xi_i = 0$ говорит о том, что данный элемент i является несущественным для реализации рассматриваемого режима функционирования системы в целом (элемент i лишний, ненужный)
5. Положительное значение $\xi_i > 0$ определяет то максимально возможное увеличение надежности P_c систем, которое она может получить, если изменить надежность только одного элемента i от нуля до единицы включительно.
6. Все элементы монотонных систем могут иметь только положительные или нулевые значения характеристик их значимости.
7. Для случая, когда процессы отказов (или отказов и восстановлений) всех элементов системы являются независимыми в совокупности, значимости (1.2.19) элементов системы равны соответствующим частным производным

$$\xi_i = \frac{\partial P_c}{\partial p_i} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, H \quad (1.2.20)$$

2. Положительные и отрицательные вклады элементов системы

Наряду с характеристиками значимости, в логико-вероятностных методах анализа систем, все большее применение начинают находить показатели положительного β_i^+ и отрицательного β_i^- вкладов и элементов, $i = 1, 2, \dots, H$. Дело в том, что показатель значимости ξ_i , по определению, не зависит от текущего значения собственного параметра p_i данного элемента и характеризует влияние на систему только теоретического, максимального, предельно возможного изменения этого параметра от 0 до 1. Однако, реальные воз-

возможности изменения собственного параметра элемента могут быть только от текущего значения p_i до 1, и от текущего значения p_i до 0. Поэтому, характеристики вкладов β_i^+ и β_i^- должны определять, на сколько изменится системный показатель P_c при указанных изменениях параметра p_i элемента i исследуемой системы. Основные расчетные формулы определения вкладов элементов следующие:

$$\beta_i^+ = \frac{P_c}{p_i} - P_c ; \quad (1.2.21)$$

$$\beta_i^- = -(P_c - \frac{P_c}{p_i}) ; \quad i=1,2,\dots,H \quad (1.2.22)$$

В отличие от показателя положительного вклада (1.2.21) при расчете показателя отрицательного вклада (1.2.22) принудительно изменяется знак. Это сделано для того, чтобы во всех показателях роли элементов положительные значения характеристик всегда означали увеличение P_c при соответствующих изменениях p_i от 0 до 1 – для β_i^+ , от p_i до 1 – для β_i^+ и от p_i до 0 – для β_i^- , и наоборот.

Для анализа системы в целях повышения ее надежности или безопасности наиболее информативной представляется характеристика положительного вклада β_i^+ элемента, вычисленная на основе прямой модели системы в целом (безотказности, безопасности). Она представляет те, реальные возможности по изменению параметров элементов системы, которые могут оказать наиболее существенное практическое влияние на увеличение надежности или безопасности исследуемой системы в целом. Например, если p_i близка к 1, то даже при большой значимости этого элемента его реальный вклад в увеличение надежности системы может оказаться крайне незначительным, что и покажет β_i^+ . Для анализа возможностей наиболее эффективного уменьшения надежности или безопасности системы лучше использовать показатель отрицательного вклада элементов.

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».

1.3.1. Краткая характеристика ПК Risk Spectrum.

В основе методологии моделирования и расчета показателей надежности и безопасности с помощью ПК Risk Spectrum лежит аппарат логико-вероятностных методов, использующих в качестве средства построения графических моделей безопасности (надежности) деревья событий (ДС) и деревья отказов (ДО), см. рис. 3.1.

Под деревом событий понимается **графическая** модель, описывающая **логику** развития различных вариантов аварийного процесса, вызываемого рассматриваемым исходным (инициирующим) событием аварии (ИС).

В ПК Risk Spectrum ДС представляется в виде таблицы, содержащей строку заголовков, поле, в котором помещен разомкнутый бинарный граф (собственно дерево событий), несколько столбцов с характеристиками конечных состояний моделируемого объекта, реализующихся в процессе осуществления аварийных последовательностей. В заголовке 1-го столбца таблицы указывается обозначение ИС (группы ИС). В последующих заголовках столбцов слева направо размещаются названия и условные обозначения промежуточных событий, соответствующих успешному или неуспешному выполнению функций безопасности, работоспособным или отказовым состояниям систем безопасности или отдельных компонентов (оборудования и технических средств), правильным или ошибочным действиям персонала. В столбцах, характеризующих конечные состояния, указываются номера КС, их условные обозначения, типы КС (например, КС с повреждением активной зоны – CD), вероятности реализации, возможно, логические формулы, соответствующие данным аварийным последовательностям (АП). Пример ДС представлен на рис. 3.2.

С помощью аварийных последовательностей на ДС отображаются варианты развития аварийного процесса. При этом под АП понимается последовательность событий, приводящих к некоторому конечному состоянию объекта, включающая исходное событие **аварии**, успешные или неуспешные срабатывания систем **безопасности** и действия личного состава (персонала) в процессе развития аварии.

Под деревом отказов понимается **графическая** модель, отображающая логику событий, приводящих к невыполнению заданной функции (отказу) системы вследствие возникновения различных комбинаций отказов оборудования и ошибок персонала. Пример ДО представлен на рис.3.3.

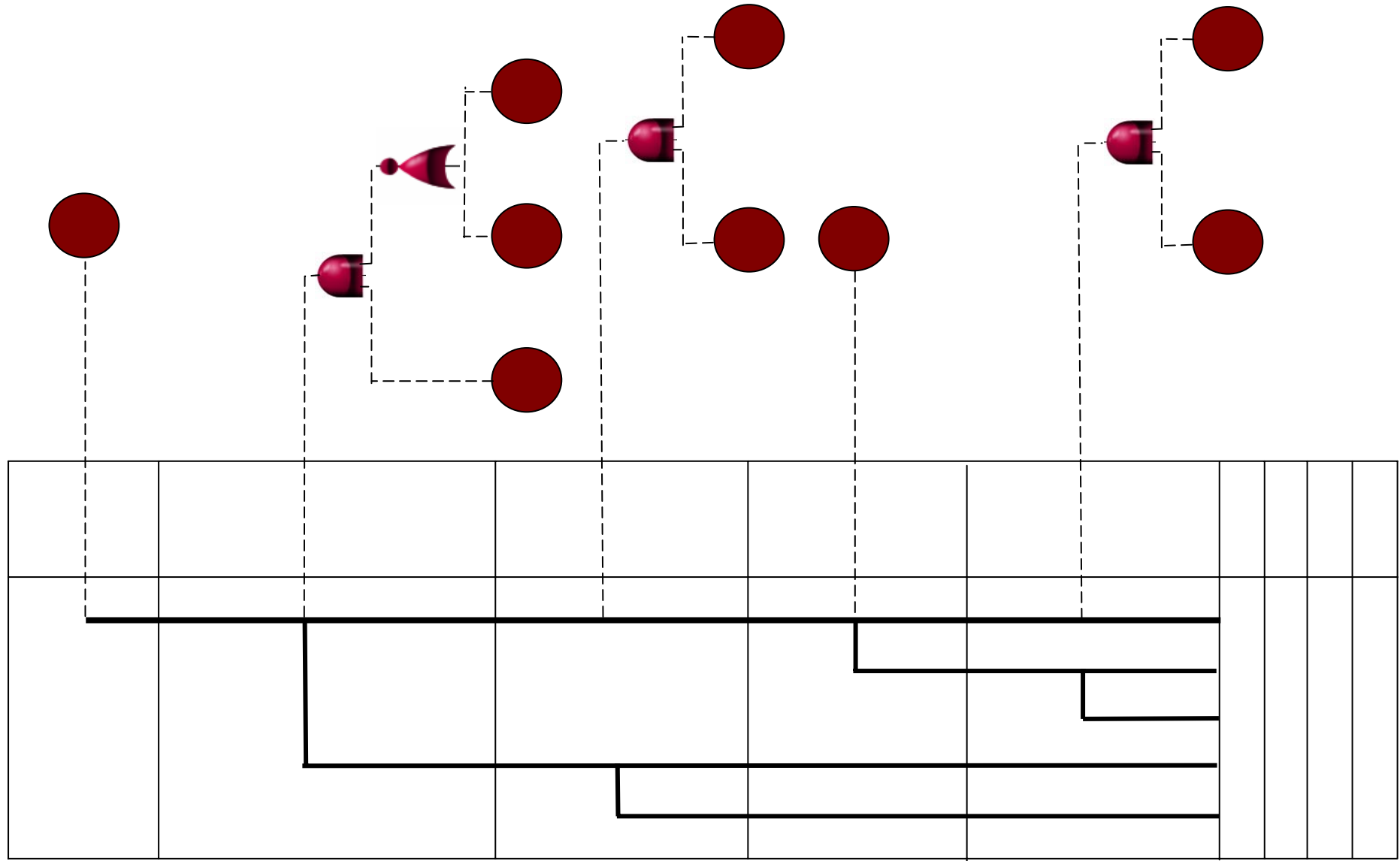


Рис. 3.1. Модель надежности (безопасности), представленная с помощью дерева событий и деревьев отказов

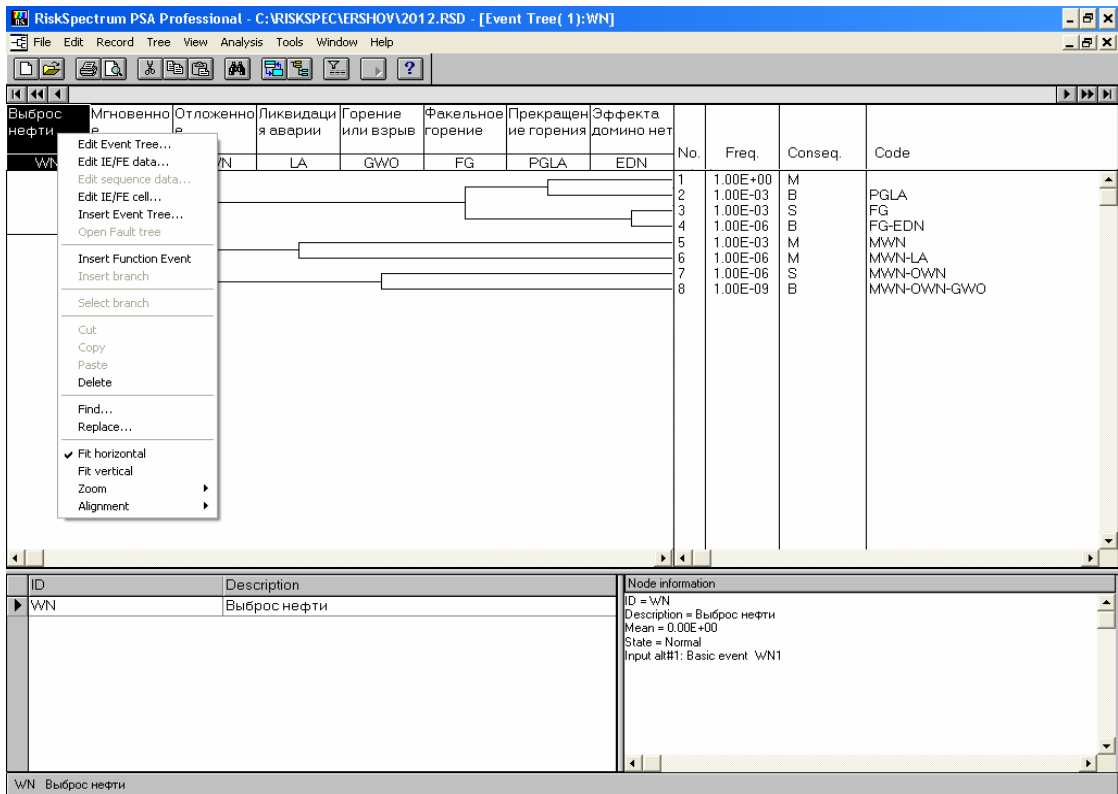


Рис. 3.2 Дерево событий в редакторе ДС

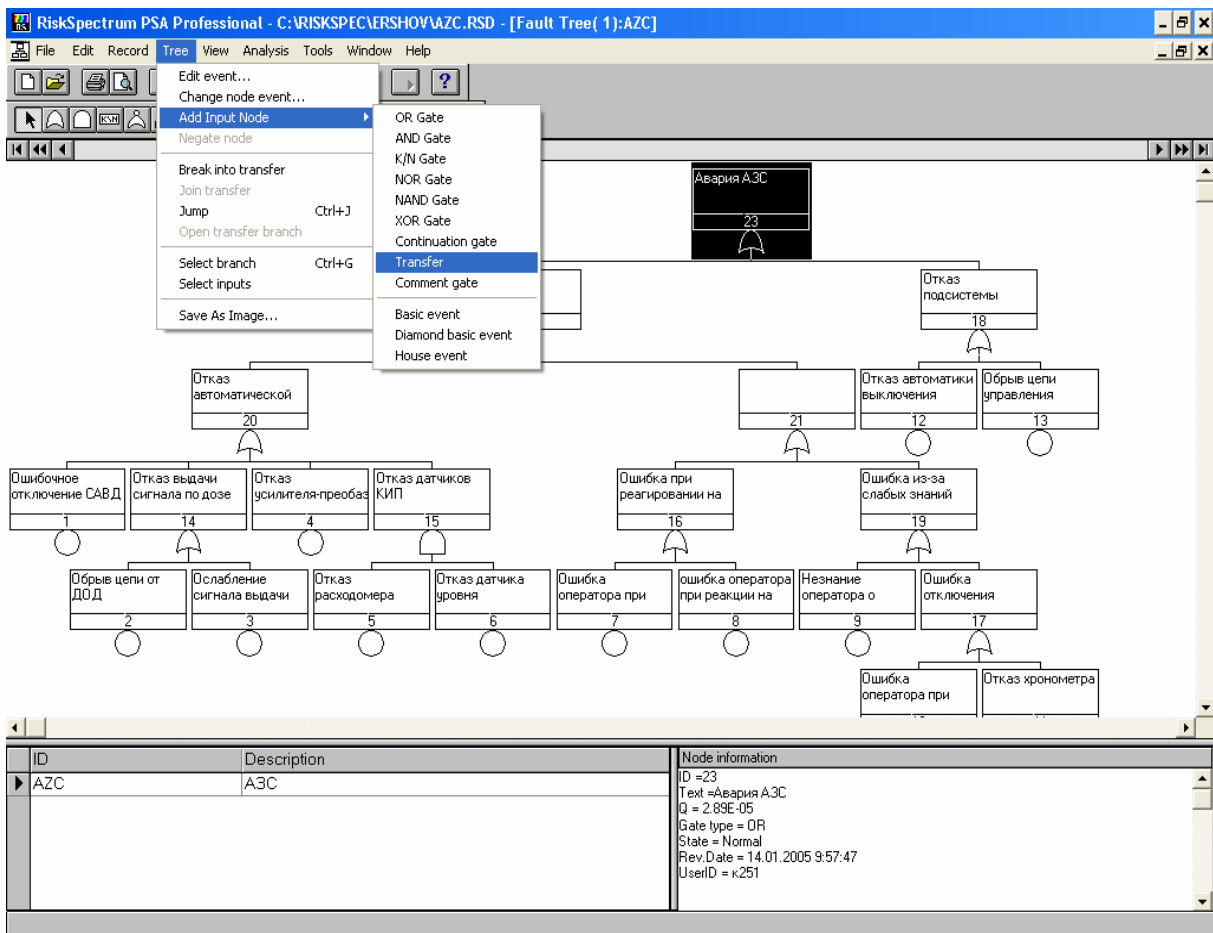



Рис. 3.3. Дерево отказов в редакторе ДО

В состав ДО входят графические элементы, служащие для отображения элементарных случайных событий (базисных событий) и для отображения логических операторов.

Как известно, логический оператор это математический (графический или буквенный) символ, служащий для отображения логической операции (конъюнкции, дизъюнкции, отрицания и т.д.), который произвольному набору случайных событий $\{A\}$, $\{B\}$, ..., $\{F\}$ ставит в соответствие сложное случайное событие $\{Z\}$. Т.о. в алгебре логики каждому логическому оператору соответствует булева функция некоторого числа логических переменных.

В графе, например, ДО, каждому логическому оператору булевой алгебры соответствует определенный графический элемент, что позволяет производить декомпозицию сложных событий на более простые (базисные или элементарные) события.

Пример: Запись $\{Z\} = \{A\} \cup \{B\}$ означает, что событие $\{Z\}$ реализуется при реализации любого из событий $\{A\}$ или $\{B\}$. Здесь обозначение \cup используется для отображения логической операции ИЛИ. В дереве отказов вместо \cup используется элемент вида: 

В таблице 3.1 представлены основные понятия и определения, используемые при описании теории ПК Risk Spectrum разработчиками комплекса.

Таблица 3.1.

Элемент модели	Определение
Дерево отказов	Древовидная структура. Начинается <i>верхним событием</i> , разбиваясь вниз по всем возможным причинам.
Верхнее событие	Нежелательное событие или состояние, для которого сформировано дерево отказов. <i>Верхнее событие</i> может также быть использовано, как более общий термин для всех типов нежелательных событий или конечных состояний в модели: <i>верхние события ДО</i> , <i>верхние события последовательности</i> и <i>верхние события последствия</i> .
Базисное событие	Событие «корневой причины» в дереве отказов, для которого не делается более детальная разработка логики дерева. Для каждого базисного события задаются <i>модель надежности</i> и набор <i>параметров надежности</i> .
Логический элемент (оператор)	Логические отношения между событиями в дереве отказов моделируются булевыми логическими операторами или <i>логическими элементами</i> . Каждый логический элемент имеет определенный тип оператора, например, ИЛИ, И, К/Н, НИ или И-НЕ.
Внешние условия	Внешние условия – специальный тип основных событий, которые могут иметь только два логических значения: ИСТИНА или ЛОЖЬ.
Параметр	Числовые значения, используемые в моделях надежности. В Risk Spectrum параметры – физически разделенные объекты данных с именем, точечной оценкой (среднее) значения и необязательным распределением неопределенности.
Дерево событий	Древовидная структура, начинающаяся с <i>исходного события</i> , очерчивающая все возможные сценарии, которые могут происходить в результате этого события.
Исходное событие	Событие или состояние, которое является «отправной точкой» в ДС, от которой начинаются все возможные сценарии. ИС - обычно нарушение или сбой. В Risk Spectrum ИС может быть <i>базисным событием</i> , <i>логическим элементом</i> дерева отказов или <i>последствием</i> , использованным в других деревьях событий.

Элемент модели	Определение
Функциональное событие	События, которые воздействуют на результат сценариев, моделируемых в дереве событий. В Risk Spectrum функциональные события могут быть <i>логическими элементами</i> дерева отказов или <i>базисными событиями</i> .
Последовательность	Путь через ДС, сценарий. Последовательности в ДС описываются в терминах успеха или отказа <i>функциональных событий</i> , принадлежащих ДС.
Точка разветвления	Каждая точка в ДС, где последовательность разветвляется на две или больше последовательностей. Каждая точка разветвления соответствует <i>функциональному событию</i> .
Последствие	<i>Последствие</i> может быть назначено каждому конечному состоянию ДС. Для нескольких последовательностей может назначаться одно последствие. Это позволяет группировать последовательности, которые ведут к одному конечному состоянию, определяя, таким образом, уровень верхних событий в модели.

К показателям надежности (безопасности), используемым в Risk Spectrum, относятся коэффициент неготовности, усредненный коэффициент неготовности, вероятность отказа, частота отказов.

Если значение коэффициента неготовности постоянно во времени, его значение равно величине усредненного коэффициента неготовности.

Если компонент или система являются невосстанавливаемыми, то коэффициент *неготовности* равен *вероятности отказа*.

Разработчики Risk Spectrum используют термины «неготовность» и «ненадежность» и для восстанавливаемых и для невосстанавливаемых компонентов. В научно-технической литературе обычно термин «неготовность» используется только для восстанавливаемых компонентов, в то время как «ненадежность» используется для невосстанавливаемых компонентов.

Также обстоит дело и с термином «частота» для восстанавливаемых и для невосстанавливаемых компонентов. В литературе, термин «частота отказов» используется только для невосстанавливаемых компонентов, в то время как «безусловная интенсивность отказов» используется для восстанавливаемых компонентов.

Термин «частота» используется в Risk Spectrum двумя немного разными способами:

1. Как тип параметра, который может быть использован в одной из моделей основного события. Эта модель названа по имени параметра, потому что это - единственный параметр в этой модели, т.о. мы имеем «модель основного события типа частота». В этом случае, «частота» относится к значению, которое является постоянным во времени. Фактически, это - параметр потока отказов Пуассона.

2. Исходное событие в ДС очень часто представляется процессом Пуассона. Традиционно при описании вероятностных параметров исходных событий используется термин

«частоты». Наиболее распространенная единица времени, используемая для этого типа частоты - «число событий в год».

Параметры «частоты» и тип «частота» основных событий (тип 5) предназначены для использования только для этого типа события.

Ожидаемое число возникновений отказов в единицу времени рассчитывается для верхнего события в анализе зависимости от времени. Оно также называется «безусловная интенсивность отказа».

1.3.2. Способы расчета вероятностных показателей надежности базисных событий.

В Risk Spectrum для базисных событий рассчитываются следующие характеристики надежности:

- Коэффициент неготовности в функции времени t (нестационарный коэффициент неготовности), $Q(t)$;
- Вероятность отказа или длительная установившаяся средняя неготовность (стационарный коэффициент неготовности), Q ;
- Безусловная интенсивность отказов во времени t , $W(t)$

В соответствии с этим каждому типу базисных событий задается определенная расчетная модель надежности. Каждая модель надежности имеет один или большее количество *параметров*. Система обозначений, используемая в формулах для расчета показателей надежности базисных событий в Risk Spectrum приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

Параметр	Описание	Связь с параметром входа RS
q	Вероятность отказа на требование	q
λ	Интенсивность отказов	r
f	Частота	f
μ	Интенсивность восстановления	$1/TR$
TR	Среднее время восстановление (MTTR)	TR
TI	Интервал между проверками	TI
TF	Время до первой проверки	TF
TM	Рассматриваемый промежуток времени (наработка)	TM

Все модели имеют один или большее количество *обязательных параметров*. Некоторые из моделей надежности в Risk Spectrum гибки и охватывают немного разные ситуации моделирования. Эти модели содержат один или более *необязательных* параметров в дополнение к требуемым.

3.2. Типы и модели надежности базисных событий

Различают следующие типы и модели надежности базисных событий:

1.3.2.1. Модель непрерывно контролируемого восстанавливаемого компонента (тип 1)

Это - «нормальный» восстанавливаемый компонент. Используется экспоненциальное распределение и для процесса отказа и для процесса восстановления, то есть и интенсивность отказов и интенсивность восстановления постоянны.

Коэффициент неготовности $Q(t)$ для этого типа компонентов (оборудования) рассчитывается по следующей формуле:

$$Q(t) = q e^{-(\lambda+\mu)t} + \left(\frac{\lambda}{\lambda+\mu}\right) (1 - e^{-(\lambda+\mu)t}) \quad (1)$$

Обязательные параметры: λ, μ (г, TR)

Необязательные параметры: q

Второй член в формуле (1) - «традиционная» модель, используемая в большинстве программ анализа дерева отказов и во многих других типах исследований надежности. В начальный момент времени $Kнг = 0$, а затем быстро увеличивается до асимптотического установившегося значения.

Первый член необязательный и в большинстве случаев не используется. Если необязательный параметр q не определен (или задано $q = 0$), первый член исчезает. Однако, если $q > 0$, то в начальный момент $Kнг = q$, а затем уменьшается асимптотически до 0 со скоростью, зависящей от заданного значения интенсивности восстановления μ . Это может использоваться в моделях для компонентов, которые имеют начальную вероятность отказа (q) на требование на момент времени $t = 0$, а затем постоянную интенсивность отказов λ . Отказавшие элементы обоих типов могут быть восстановлены с постоянной интенсивностью восстановления μ .

Стационарный $Kнг$ для типа 1 модели надежности вычисляется по выражению:

$$Q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2)$$

Безусловная интенсивность отказа $W(t)$ для типа 1 компонента рассчитывается по формуле:

$$W(t) = \lambda(1 - Q(t)) \quad (3)$$

Нормальное поведение (с $q = 0$) функции $W(t)$ состоит в том, что ее значение начинается с λ и затем медленно уменьшается до асимптотического значения. Если значение $Kнг$ невелико, то $W(t)$ приблизительно равна интенсивности отказов.

1.3.2.2. Модель периодически проверяемого компонента (тип 2)

Это наиболее сложная из моделей надежности в Risk Spectrum. В ее самой простой форме, при задании только интенсивности отказов и интервала между проверками, она соответствует «традиционной» модели для периодически проверяемого компонента. Для нее задают следующий набор обязательных и необязательных параметров:

Обязательные параметры: $\lambda, Tп$ (г, TI)

Необязательные параметры: q, TR, TF

Модель предполагает экспоненциальное распределение для вероятности отказа (постоянная интенсивность отказов), постоянный установленный интервал между проверками, постоянное установленное время восстановления (если TR используется).

Чтобы упростить понимание этой модели, мы будем сначала представлять ее только с обязательными параметрами, то есть интенсивностью отказов и интервалом между проверками. КНГ в этом случае рассчитывается по формуле:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda(t-T_i)}, \quad T_i = 0, TI, 2TI, \dots \quad (4)$$

Эта модель приводит к классической пилообразной кривой для функции неготовности.

Если задается параметр TF (время до первой проверки), то модель идентична, за исключением того, что моменты времени испытаний «смещены» на величину TF , то есть моменты времени испытаний - $T_i = 0, TF, TF + TI, TF + 2TI, \dots$

Среднюю неготовность Q_{mean} получают, интегрируя функцию $Q(t)$ по полному циклу испытания:

$$Q = \frac{1}{TI} \int_0^{TI} Q(t) dt = 1 - \frac{1}{\lambda TI} (1 - e^{-\lambda TI}) \quad (5)$$

Модель, описанная выше, предполагает, что время восстановления невелико (строго говоря $TR = 0$). Если это условие не имеет силы, то можно ввести в модель необязательный параметр TR . При этом учитывается вклад в значение коэффициента неготовности от времени ремонта.

В модели приняты следующие допущения:

Восстановление производится непосредственно после испытания, если при испытаниях был выявлен отказ компонента.

Продолжительность восстановления принято равным установленному времени TR .

Коэффициент неготовности $Q(t)$ для 2-го типа компонентов при учете времени восстановления TR вычисляется с помощью следующих формул:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{for } t < TF \quad (1)$$

$$Q(t) = Q(TI) = 1 - e^{-\lambda TI} \quad \text{for } t = TF + nTI \quad (2)$$

$$Q(t) = Q(TI) + (1 - Q(TI))(1 - e^{-\lambda(t-TI)}) \quad \text{for } TI < t < TI + TR$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda(t-TI)} \quad \text{for } TI + TR < t < 2TI \quad (3)$$

Средняя неготовность, когда восстановление принято во внимание, вычисляется по формуле:

$$Q = 1 - \frac{1}{\lambda TI} (1 - e^{-\lambda TI}) + (1 - e^{-\lambda TI}) x \frac{TR}{TI} \quad (4)$$

Также можно учитывать необязательный постоянный вклад неготовности q . Это, например, вероятность отказа на требование, не выявляемая испытаниями. В этом случае значение поставляющей q добавляется ко всем формулам неготовности:

$$Q(t) = q + 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{for } t < TF \quad (5)$$

$$Q(t) = Q(TI) = q + 1 - e^{-\lambda TI} \quad \text{for } t = TF + nTI \quad (6)$$

$$Q(t) = Q(TI) + (1 - Q(TI))(q + 1 - e^{-\lambda(t-TI)}) \quad \text{for } TI < t < TI + TR \quad (12)$$

$$Q(t) = q + 1 - e^{-\lambda(t-TI)} \quad \text{for } TI + TR < t < 2TI \quad (7)$$

Средняя неготовность в этом случае составляет:

$$Q = q + 1 - \frac{1}{\lambda TI} (1 - e^{-\lambda TI}) + (q + 1 - e^{-\lambda TI}) x \frac{Tr}{TI} \quad (8)$$

Безусловная интенсивность отказа $W(t)$ во всех случаях следует из нормальной формулы:

$$W(t) = \lambda(1 - Q(t)) \quad (9)$$

1.3.2.3. Модель с постоянным значением величины неготовности (тип 3)

Это простая, но часто используемая модель, которая использует постоянное значение неготовности q , как единственный параметр. Это обычно используется в ситуациях, где необходим учет «вероятности отказа на требование». Как правило, она используется при моделировании компонентов / систем, которые находятся в действии и изменяют состояние при поступлении соответствующего сигнала. Примеры: Отказ арматуры при открытии/закрытии, отказ выключателей, отказ двигателя при пуске/останове.

Параметры этой модели не зависят от времени работы. Формулы для неготовности $Q(t)$, длительной средней неготовности Q_{mean} и безусловной интенсивности отказа $W(t)$ имеют следующий вид:

$$Q(t) = q \quad (10)$$

$$Q = q \quad (11)$$

$$W(t) = 0 \quad (12)$$

1.3.2.4. Модель с заданным рассматриваемым промежутком времени (тип 4)

Эта модель, которая имеет сходство с моделью элементов 3 типа. Однако величина стационарного значения неготовности не задается, а рассчитывается по значениям интенсивности отказов и установленной времени работы компонента. Необязательная постоянная составляющая неготовности q может также быть добавлена.

Количественные характеристики параметров надежности рассчитываются по формулам:

$$Q(t) = q + 1 - e^{-\lambda TM} \quad (= \text{constant}) \quad (13)$$

$$Q = q + 1 - e^{-\lambda TM} \quad (= \text{constant}) \quad (20)$$

$$W(t) = 0 \quad (14)$$

Обязательные параметры: λ (r), ТМ

Необязательные параметры: q

1.3.2.5. Модель постоянного значения частоты (тип 5)

Эта модель используется, когда событие описывается процессом Пуассона, то есть события происходят с постоянной частотой (скоростью). Расчетные выражения при этом имеют следующий вид:

$$Q(t) = 0 \quad (22)$$

$$Q = 0 \quad (15)$$

$$W(t) = f \quad (16)$$

Эта модель обычно используется только для исходных событий. Исходные события обычно используются в деревьях событий, но они могут также быть использованы как основные события в деревьях отказов. Если они используются в деревьях отказов, должны соблюдаться определенные правила при дальнейших вычислениях. Эти правила будут описаны ниже при описании типов анализа в разделе MCS-анализа.

1.3.2.6. Модель невозстанавливаемого компонента (тип 6)

Это «традиционная» невозстанавливаемая модель компонента с показательной моделью отказа, то есть постоянной интенсивностью отказов. Как во многих других моделях компонентов в Risk Spectrum в нее добавлена возможность использования необязательной постоянной составляющей вероятности отказа. Это может быть использовано в ситуациях, где имеется вероятность отказа на требование во время $t = 0$.

Эта модель требует задания рассматриваемого промежутка времени Т, который является моментом времени, заданным в спецификации MCS-анализа. Для вычисления показателей надежности компонентов данного типа используются выражения.

$$Q(t) = q + 1 - e^{-\lambda t} \quad (17)$$

$$W(t) = \lambda(1 - Q(t)) \quad (18)$$

Обязательные параметры: λ (r)

Необязательные параметры: q

Для этой модели не имеет смысла определять длительную установившуюся среднюю неготовность Q, потому что неготовность увеличивается асимптотически до 1.

Окно выбора модели надежности для базисных элементов представлено на рис.3.4.

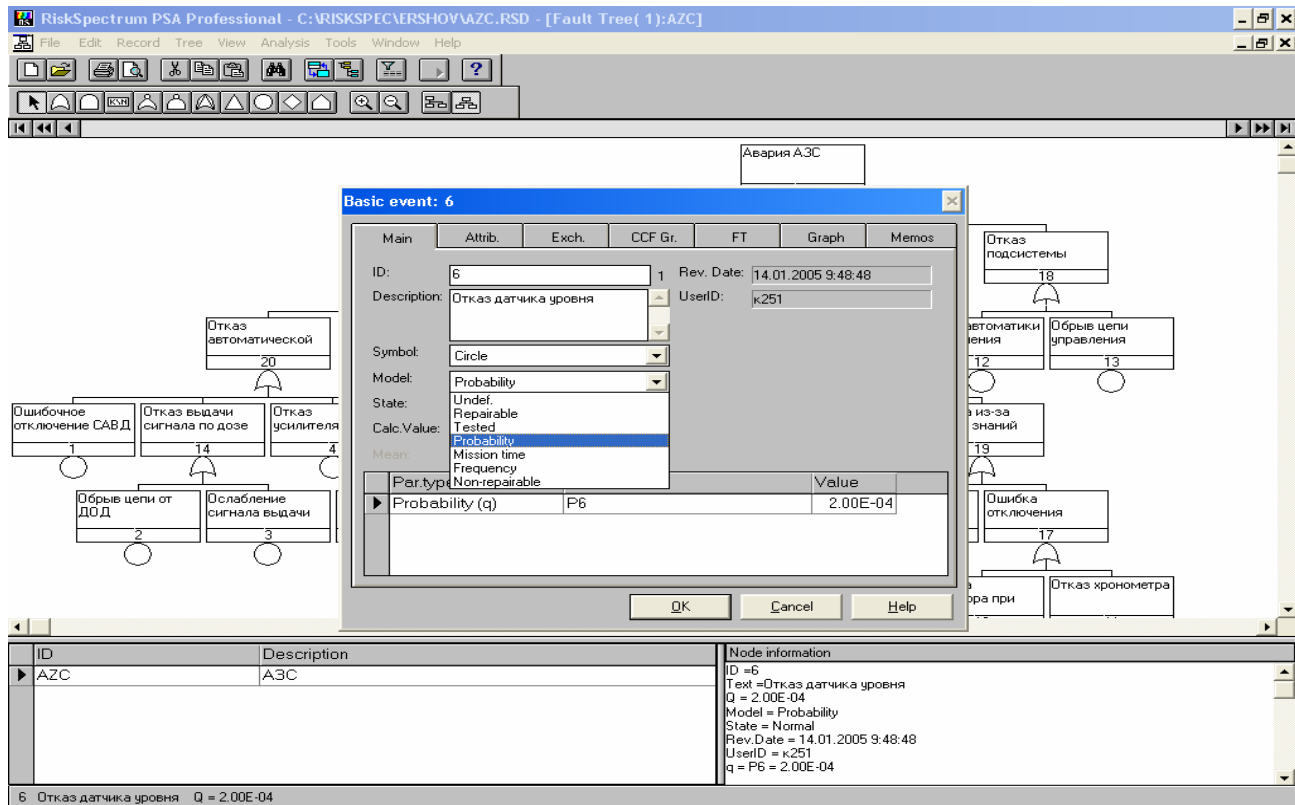


Рис. 3.4. Окно выбора модели надежности базисных элементов

1.3.3. Параметры моделей надежности

Параметр модели надежности в Risk Spectrum - в основном числовое значение, не обязательно включающее распределение неопределенности. Имя параметра может быть расценено как переменная, которая будет использоваться в математических формулах для вычислений надежности. Когда формула рассчитывается, имя переменной заменяется числовым значением, сохраненным в записи параметра.

Значение параметра определяется точечной оценкой (среднее) значения и, не обязательно, распределением неопределенности.

1.3.3.1. Типы параметров

Имеется 8 различных типов параметров в моделях надежности Risk Spectrum. Они перечислены в таблице 3.3. Там же указаны числовые ограничения для каждого параметра.

Таблица 3.3.

Тип параметра	Обозначение	Пределы
Вероятность	q	$0 < q < 1$
Интенсивность отказов, частота	r, f	$0 < r < 1.0E+32$
Время восстановления (MTTR)	TR	$0 < TR < 1.0E+32$
Интервал между проверками	TI	$0 < TI < 1.0E+32$
Время до первой проверки	TF	$0 < TF < 1.0E+32$
Рассматриваемый промежуток времени	TM	$0 < TM < 1.0E+32$
CCF	*	$0 < * < 1$

* Параметры CCF могут быть различны, в зависимости от модели CCF. См. раздел, описывающий модели CCF.

1.3.3.2. Распределения неопределенностей для параметров моделей надежности

В таблице 3.4 перечислены используемые типы распределений неопределенности, а также параметры соответствующих распределений, которые должны быть определены для каждого параметра моделей надежности.

Таблица 3.4.

Тип распределения	Параметры распределения
Логнормальное	Среднее, фактор ошибки (EF)
Бета	Среднее, α (параметр формы)
Гамма	Среднее, α (параметр формы)
Нормальное	Среднее, среднеквадратичное отклонение
Однородное	Минимум, максимум
Логоднородное	Минимум, максимум
Дискретное	По крайней мере два значения процентиля

Примечание:

Средние значения параметров используются для MCS-анализа, анализа значимости, исследований чувствительности и анализа зависимости от времени. Распределения неопределенности используются только для анализа неопределенности.

1.3.4. Деревья отказов

При построении деревьев отказов в редакторе ДО ПК Risk Spectrum используется семь типов логических операторов:

Таблица 3.5.

Тип логического оператора	Значение: логический элемент есть ИСТИНА если:
ИЛИ	По крайней мере одно входное событие ИСТИНА
И	Все входные события ИСТИНА
К-из-N (K/N)	По крайней мере K из N входных событий ИСТИНА *
НИ (ИЛИ-НЕ)	Ни одно из входных событий не есть ИСТИНА (все входные события ЛОЖЬ)
И-НЕ	Не все входные события ИСТИНА (По крайней мере одно входное событие ЛОЖЬ)
Неэквивалентность (исключающее ИЛИ)	Точно одно входное событие - ИСТИНА
Комментарий (не логика)	Единственное входное событие - ИСТИНА

* Максимальное число входов и ограничения значения K зависят от возможного объема памяти и полного размера дерева отказов. K/N-логические элементы расширяются до эквивалентного числа ИЛИ - / И - логических элементов.

Обозначения логических операторов представлены в нижнем ряду панели инструментов на рис. 3.3.

НЕ - оператор

Помимо вышперечисленных логических элементов, имеется еще один, дополнительный, логический оператор, который может быть использован в деревьях отказов: *НЕ - оператор*. Его можно считать логическим «инвертором». *НЕ - оператор* может быть исполь-

зован в каждом узле в дереве отказов, которое содержит основное событие или внешнее условие. Символ НЕ - *оператора* в Risk Spectrum - маленький круг, только выше узла.

НЕ – *оператор* имеет следующее влияние на логику, см. таблицу 3.6:

Таблица 3.6.

Событие в узле	Узел (вход логического элемента)
ИСТИНА	ЛОЖЬ
ЛОЖЬ	ИСТИНА

В текущей версии Risk Spectrum отрицательная логика обрабатывается, как «псевдо-отрицательная логика». Это означает, что дополненные (отрицаемые) события обрабатываются следующим способом в МСО -исследованиях:

Любой набор сечений, содержащий взаимно исключающие события, удаляется. Такой набор сечений не может происходить, потому что взаимно исключающие события не могут происходить одновременно.

Дополненные события не включаются в наборы минимальных сечений, произведенные в МСО -анализе, то есть МСО содержат только события отказа и не любые события успеха.

«Псевдоотрицательная логика» обычно нужна из-за необходимости представить отрицательную логику в деревьях отказов: обработать взаимно исключающих событий таким способом, что комбинации (наборы сечений), содержащие взаимно исключающие события были невозможны.

Внешние условия

Внешнее условие может быть включено в логику дерева отказов, подобно базисному событию, но оно действует как «логический переключатель» который может иметь только одно из булевых значений ИСТИНА или ЛОЖЬ (ВКЛ\ВЫКЛ).

Внешние условия используют, чтобы изменить структуру дерева отказов. При этом могут быть получены различные вариации исходного дерева отказов. «Параметры настройки» внешнего условия (ИСТИНА / ЛОЖЬ) могут быть определены двумя способами:

Установить внешнее условие ИСТИНА или ЛОЖЬ в базе данных («жесткая» установка). Это означает, что это - всегда ИСТИНА или ЛОЖЬ во всех исследованиях, которые включают это внешнее условие.

Включить его в набор граничных условий (набор ГУ), где список внешних условий может быть определен, наряду с установкой ИСТИНЫ / ЛЖИ. Набор ГУ может тогда быть использован в случаях анализа, исходных событиях или функциональных событиях.

Внешние условия воздействуют на логику различных типов логических элементов так, как описано в таблице 3.7

Логические элементы, которые примут значения ИСТИНА или ЛОЖЬ из-за введения внешних условий, будут самостоятельно действовать как внешние условия и действие внешних условий может, таким образом, распространяться по структуре дерева отказов.

Во всех случаях внешние условия (и логические элементы, которые примут значения ИСТИНА или ЛОЖЬ) удаляются из структуры дерева после того, как их влияние на логику будет определено.

Таблица 3.7.

Логический элемент «ИЛИ»	1 или большее количество входов ИСТИНА == > ИСТИНА на выходе
	Все входы ЛОЖЬ == > ЛОЖЬ на выходе
	1 или большее количество (но меньше чем все) входов ЛОЖЬ == > Никакого влияния
Логический элемент «И»	1 или большее количество входов ЛОЖЬ == > ЛОЖЬ на выходе
	Все входы ИСТИНА == > ИСТИНА на выходе
	1 или большее количество (но меньше чем все) входов ИСТИНА == > Никакого влияния
Логический элемент К/Ν	К или большее количество входов ИСТИНА == > ИСТИНА на выходе
	(N-K+1) или большее количество входов ЛОЖЬ == > ЛОЖЬ на выходе
	М. (где М. < К) входы ИСТИНА == > Логический элемент становится (K-1)/N
	М. (где М. < N-K+1) входы ЛОЖЬ == > Логический элемент становится К / (N-1)
Логический элемент НИ	1 или большее количество входов ИСТИНА == > ЛОЖЬ на выходе
	Все входы ЛОЖЬ == > ИСТИНА НА ВЫХОДЕ
	1 или большее количество (но меньше чем все) входов ЛОЖЬ == > Никакого влияния
Логический элемент И-НЕ	1 или большее количество входов ЛОЖЬ == > ИСТИНА на выходе
	Все входы ИСТИНА == > ЛОЖЬ на выходе
	1 или большее количество (но меньше чем все) входов ИСТИНА == > Никакого влияния
Логический элемент исключаящее ИЛИ	Точно 1 входная ИСТИНА == > ИСТИНА на выходе
	Больше чем 1 входы ИСТИНА == > ЛОЖЬ на выходе
	Все входы ЛОЖЬ == > ЛОЖЬ на выходе
	1 или большее количество (но меньше чем все) входы ЛОЖЬ == > Никакого влияния

Внешние условия могут также использоваться внутренне в логических элементах и основных событиях вместе с так называемыми заменами событий, как это описано ниже.

Замены событий

В Risk Spectrum Вы можете определить так называемые замены событий. Условная замена события определяется внешним условием (граничное условие, которое сообщает программе, когда замена событий должна быть использована) и основным событием (замена событий). Функция следующая:

В течение анализа дерева отказов, находят логический элемент или основное событие с внешним условием ИСТИНА в списке замен событий. Первоначальный логический элемент или основное событие заменяют тогда основным событием, указанным как замена событий. Это - очень удобный способ условно заменить одно событие другим.

Если имеется больше, чем одно граничное условие ИСТИНА в таблице замены событий для основного события или логического элемента, программа будет использовать **последнее** граничное условие ИСТИНА для замены.

1.3.5. Моделирование отказов по общей причине

1.3.5.1. Логика модели ООП

Особенность моделирования ООП, обеспеченного группами ООП - фактически создание такого же типа структуры дерева отказов, который обычно формируется вручную.

Функциональные возможности групп ООП поясним на примере. Предположим, что имеется четыре резервированных компонента - А, В, С и D, для которых мы моделируем ООП. Первоначально индивидуальные отказы этих четырех компонентов представлены четырьмя основными событиями в дереве отказов. Когда эти основные события (также называемые А, В, С, D, для простоты) существуют, Вы можете создавать запись группы ООП, где Вы определяете, что эти четыре основных события должны принадлежать определенной группе.

После обозначения группы ООП определяется модель ООП (бета-фактора, множественных греческих букв или альфа-фактора) и параметры выбранной модели ООП.

После окончания ввода данных по ООП программа автоматически создает следующие *события ООП*:

AB, AC, AD, BC, BD, CD, ABC, ABD, ACD, BCD, ABCD

(здесь, например, AB означает ООП обоих компонентов - А и В)

На следующем шаге каждое из базисных событий, которые имелись в дереве отказов и подвержены ООП заменяется деревом с верхним событием «ИЛИ» (называемой логическим элементом ООП) куда входят индивидуальное событие отказа компонента и события ООП, включающие это базисное событие (отказ компонента). Например, основное событие А заменяется схемой «ИЛИ» с элементами А (индивидуальный отказ), АВ, АС, АД, АВС, ABD, ACD и ABCD, как входами.

1.3.5.2. Расчет вероятностей ООП

Квантификация различных событий ООП делается на основе модель надежности первичного базисного события в группе ООП, выбранной модели ООП и соответствующих параметров моделей.

Параметры моделей ООП, которые могут быть использованы в Risk Spectrum указаны в таблице 3.8

Таблица 3.8.

Модель CCF	Параметры CCF
Бета-фактора	Бета, β
Множественных греческих букв (МГБ)	Бета, β
	Гамма, γ
	Дельта, δ

Модель ССФ	Параметры ССФ
Альфа-фактора	Альфа 2, α_2
	Альфа 3, α_3
	Альфа 4, α_4

Комбинации событий ООП могут иметь порядок 2, 3 и N, где N - общее количество базисных событий, которые принадлежат группе. Если больше чем три компонента отказывают из-за ООП, это моделируется так, как будто **все** компоненты в группе отказывают. Другими словами, при моделировании ООП не делают различия между ООП порядка 4 или выше, даже если это теоретически возможно в моделях МГБ и альфа-фактора. В модели бета-фактора, по определению, различают только индивидуальные отказы и ООП, т.е. если происходит отказ по общей причине, то считается, что все компоненты отказывают одновременно.

Программа вычисляет неготовность для каждого события ООП, основываясь на модели надежности, основных параметрах надежности, модели ООП и параметрах ООП, которые определены в ООП-группе.

Эти вычисления делаются в соответствии с нижеприведенными формулам, в которых используется следующая система обозначений:

Таблица 3.9.

Q_{tot}	«Полная» неготовность для каждого основного события в группе ССФ. Эта неготовность рассчитывается, используя модель надежности и параметры, указанные в группе ССФ.
Q_k	Неготовность для события ССФ порядка k, то есть ССФ, включающего k компонентов (основные события).
N	Число основных событий в группе ССФ.

Термин «неготовность» здесь используется в общем смысле. В зависимости от выбранного типа вычислений, она является или неготовностью в определенный момент времени ($Q_{tot}(t)$ и $Q_k(t)$), или длительной средней неготовностью ($Q_{tot, mean}$ и $Q_{k, mean}$)

В большинстве случаев, группы ООП не включают более четырех компонентов.

1.3.5.2.1 Модель бета-фактора

Общие формулы:

$$Q_k = (1 - \beta)Q_{tot} \quad k = 1 \quad (19)$$

$$Q_k = 0 \quad 1 < k < N \quad (20)$$

$$Q_k = \beta Q_{tot} \quad k = N \quad (29)$$

Формулы для ООП с четырьмя компонентами:

$$Q_1 = (1 - \beta)Q_{tot} \quad (30)$$

$$Q_2 = 0 \quad (31)$$

$$Q_3 = 0 \quad (32)$$

$$Q_4 = \beta Q_{tot} \quad (33)$$

1.3.5.2.2 Модель множественных греческих букв (МГБ)

Общие формулы:

$$Q_k = \frac{1}{\binom{m-1}{k-1}} \left(\prod_{i=1}^k \rho_i \right) (1 - \rho_{k+1}) Q_{tot}$$

$$\rho_1 = 1, \rho_2 = \beta, \rho_3 = \gamma, \dots, \rho_{N+1} = 0 \quad (34)$$

Формулы для ООП с четырьмя компонентами:

$$Q_1 = (1 - \beta) Q_{tot} \quad (35)$$

$$Q_2 = \frac{1}{3} \beta (1 - \gamma) Q_{tot} \quad (36)$$

$$Q_3 = \frac{1}{3} \beta \gamma (1 - \delta) Q_{tot} \quad (37)$$

$$Q_4 = \beta \gamma \delta Q_{tot} \quad (21)$$

1.3.5.2.3 Модель альфа-фактора

Общие формулы:

$$Q_k = \frac{k}{\binom{m-1}{k-1}} \frac{\alpha_k}{\alpha_{tot}} Q_{tot}$$

$$\alpha_{tot} = \sum_{k=1}^N k \alpha_k \quad (22)$$

Формулы для ООП с четырьмя компонентами:

$$Q_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_{tot}} Q_{tot} \quad (40)$$

$$Q_2 = \frac{2}{3} \frac{\alpha_2}{\alpha_{tot}} Q_{tot} \quad (41)$$

$$Q_3 = \frac{\alpha_3}{\alpha_{tot}} Q_{tot} \quad (42)$$

$$Q_4 = 4 \frac{\alpha_4}{\alpha_{tot}} Q_{tot} \quad (23)$$

Вычисление безусловной интенсивности отказа для событий ООП выполняется согласно тем же самым формулам, перечисленным выше для вычисления неготовности, но Q_{tot} заменяется W_{tot} , где W_{tot} - «полная» частота, рассчитываемая при использовании модели надежности и параметров, указанных в группе ООП. Это вычисление частоты соответствует формулам используемым для расчета показателей надежности основных событий.

1.3.5.3. Квантификация ООП для шахматного порядка испытаний

При вычислении неготовности для событий с ООП, у которых модель надежности «периодически проверяемая», и когда задан тип вычисления «Зависимость от времени» (то есть неготовность рассчитывается на определенный момент времени), параметры времени до первой проверки обрабатываются специальным способом, чтобы принять во внимание влияние шахматного порядка испытания компонентов в группе ООП:

- Для каждого события ООП, основные события, включенные в ту специфическую комбинацию проверяются на параметры TF (время до первой проверки). Программа решает, что **самое короткое** время прошло, если какой-либо из этих компонентов был проверен.
- Время, согласно вышеупомянутому используется, как «время после последнего испытания» (T_L) при вычислении $Q_{tot}(t)$ (см. главу «Модели основного события» для описания периодически проверяемой модели надежности основного события).

Влияние шахматного порядка испытаний (различные значения TF) будет принято во внимание логическим и непротиворечивым способом. Для каждого события ООП, **каждое** испытание **любого** из компонентов, включенных в событие ООП, рассматривается как испытание этого частного ООП.

1.3.6. Деревья событий

Как следует из рисунка 3.1 к каждому заголовку дерева событий «подключено» либо базисное событие, либо дерево отказов или, другими словами, каждый заголовок ДС имеет свой «вход».

1.3.6.1. Исходные события

Входами для исходного события в ДС Risk Spectrum могут служить:

- Базисное событие
- Логический оператор (гейт) дерева отказов
- Последствие (из другого ДС).

Если входом для ИС служит последствие, то ИС фактически заменяется верхним логическим элементом «дерева отказов последствия» (см. ниже), который объединяет по схеме ИЛИ все последовательности с этим последствием во всех других деревьях событий.

Можно вводить несколько строк входов для каждого ИС. Каждая строка это альтернативное исходное событие, и имеет индекс «Alt#», автоматически нумеруемый 1, 2, 3 ...

Каждое альтернативное ИС определяется входным событием (основное событие, логический оператор или последствие) и необязательным набором граничных условий (набор ГУ). ИС может быть использовано в нескольких ДС, но каждое ДС может использовать только одну альтернативу (значение по умолчанию - Alt# = 1).

Если набор ГУ определен для переменной исходного события, которая «задействована» в дереве событий, этот набор ГУ действует по всему дереву событий (он действует слева направо по дереву событий).

Параметры настройки ИСТИНА / ЛОЖЬ в наборе ГУ в исходном событии останутся в этом значении для всех деревьев отказов последовательности и деревьев отказов последствия для этого дерева событий. Однако, если имеется любое последствие в этом дереве событий, которое используется, как исходное событие в другом дереве событий, эти граничные условия не будут «переходить» следующим деревьям событий в цепочке.

1.3.6.2. Функциональные события

Входами для функциональных событий (ФС) в Risk Spectrum могут служить:

- Основное событие
- Логический оператор дерева отказов

Основные события и логические элементы включаются в «деревья отказов последовательности», как описано ниже.

Для каждого ФС можно вводить несколько строк входов. Каждая строка есть альтернативное ФС и имеет индекс «Alt#», автоматически нумеруемый 1, 2, 3 ...

Каждое альтернативное ФС определяется входным событием (основное событие или логический оператор) и необязательным набором граничных условий (набор ГУ). Каждая ветвь дерева событий может использовать одну альтернативу (значение по умолчанию Alt# = 1). (Переменные ветви могут быть отредактированы путем двойного нажатия на точку ветвления.)

Если набор ГУ определен для переменной ФС, которая «задействована» в ветви, этот набор ГУ действует по всей ветви слева направо по дереву событий.

В дополнение к исходному событию, также можно активизировать набор граничных условий в каждой точке ветвления (см. переменные функционального события).

Набор граничных условий, активизированный в ветви, будет активен в этой ветви и во всех последующих точках ветвления, пока концы последовательности в этом дереве не будут достигнуты.

1.3.6.3. Учет вероятностей успешной реализации функционального события при расчетах вероятностей реализации конечных состояний

Вероятность реализации какого-либо конечного состояния (КС) в дереве событий рассчитывается, в общем случае, путем перемножения вероятностей реализации или не реализации функциональных событий, входящих в соответствующую аварийную последовательность. Однако при этом возможны различные варианты учета успехов для ФС (например, вероятностей успешного срабатывания систем безопасности АЭС).

В ПК Risk Spectrum используются пять возможных вариантов «обработки успеха» для функциональных событий:

- Пропуск успеха в ДС
- Логический успех ДС (значение по умолчанию)
- Логическая и простая квантификация

- Де Морган в ДО

- Де Морган в ДО и ДС

При выборе пункта «Пропуск успеха в ДС» программа не включает логику успеха в последовательности, в которые входят успешные исходы каких-либо ФС.

При выборе пункта «Логический успех в ДС», программа включает логику успеха в последовательности, в которые входят успешные исходы каких-либо ФС, но вероятности реализации этих событий успеха не учитываются при расчетах. Точнее, вероятности успеха обрабатываются так, как будто они равны 1.

При выборе пункта «Логическая и простая квантификация», программа включает логику успеха в последовательности, в которые входят успешные исходы каких-либо ФС, и вероятности реализации этих событий успеха учитываются при расчетах.

При выборе пункта «Де Морган в ДО», программа применит правила Де Моргана ко всем инвертированным логическим элементам в деревьях отказов. Это означает, что вся отрицательная логика будет перемещена до уровня основных событий в деревьях отказов. Инвертированные основные события будут сохраняться в сечениях, и они будут определены количественно.

При выборе пункта «Де Морган в ДО и ДС », программа применит правила Де Моргана ко всем инвертированным логическим элементам в деревьях отказов и ко всем инвертированным функциональным событиям в последовательностях дерева событий. Это означает, что вся отрицательная логика будет перемещена до уровня основных событий в деревьях отказов, включая деревья отказов, подключенные к инвертированным функциональным событиям. Инвертированные основные события будут сохраняться в сечениях, и они будут определены количественно.

Окно выбора варианта учета успешных исходов функциональных событий представлено на рисунке 3.5.

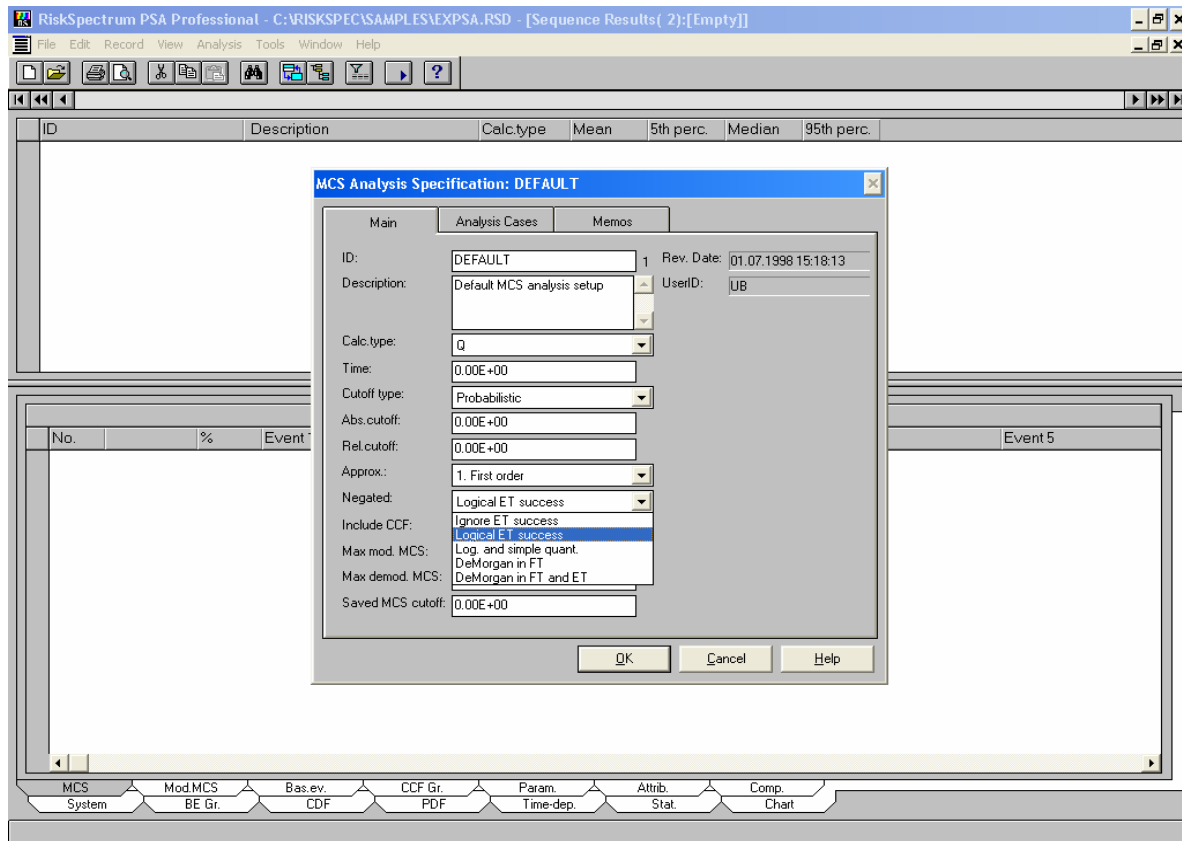


Рис. 3.5. Окно выбора варианта учета успешных исходов функциональных событий

1.3.7. Генерация и анализ минимальных сечений отказов

Цель генерации и анализа МСО состоит в получении, так называемых, наборов МСО деревьев отказов и выполнении расчетов точечной оценки вероятности реализации верхнего события ДО. ДО - графическое представление булевой функции и эта булева функция может быть преобразована, путем использования законов булевой алгебры, во множество МСО. МСО это комбинация базисных (элементарных) событий, реализация которых вызывает реализацию верхнего события. Термин «минимальное сечение» означает, что, если любое из базисных событий удалено из множества, верхнее событие будет не реализовано.

1.3.7.1. Краткая характеристика задачи генерации и анализа МСО

Анализ МСО состоит следующих главных этапов:

- Чтение информации о верхнем событии, подлежащем анализу. Если определена группа анализа, то чтение информации о списке верхних событий.
- Чтение технических требований для данного случая анализа.
- Чтение фундаментальных данных из полной базы данных проекта и сохранение ее во внутренней памяти. Эти данные включают средние значения параметров, модели основного события, параметры и определения логики логического оператора (тип логического элемента и исходные события).
- Формирование внутренней структуры данных, которая соответствует ДО, подлежащему анализу, начиная с указанного верхнего логического элемента. Для верхних событий ДО это

достаточно простая задача. Для верхних событий последовательностей и верхних событий последствий этот шаг включает формирование конструкции дерева отказов из логики дерева событий, что является значительно более сложной задачей. Важная часть этого шага состоит в изменении логики дерева отказов в соответствии с состояниями внешнего условия, указанными в определении верхнего события (верхние события ДО) или в ДС. Когда этот шаг закончен, результат - всегда ДО с одним верхним событием.

- Проверка дерева на циклы. Если в ДО имеются циклы, выполнение анализа будет прервано сообщением об ошибке, указывающим логические элементы, включенные в цикл.

- Вычисление «неготовности» для каждого базисного события в соответствии с заданным типом вычисления (среднее значение или функция времени) и моделью надежности.

- Проверка дерева для основных событий, которые включены в группы ООП. Эти основные события автоматически заменяются деревьями отказов, которые моделируют все возможные комбинации событий ООП. Вычисление неготовности для каждого события ООП в соответствии с заданной моделью надежности и моделью ООП, указанной в группах ООП.

- Реструктуризация и построение из модулей дерева отказов, чтобы получить более «оптимальную» конструкцию, т.к. это упрощает и ускоряет генерацию МСО на более поздней стадии. Наиболее важная часть этого шага - нахождение так называемых **модулей** в ДО. Модули - независимые ветви дерева, которые могут быть обработаны как основные события при генерации МСО.

- Генерация МСО для верхнего события ДО. При получении МСО задаются критерий останова и значение останова моделирования. Конечный продукт этого шага - список всех сохраненных МСО после того, как было применено отсечение. Эти МСО строятся из модулей, то есть если в дереве имеются модули, то эти модули не расшифровываются (не разворачиваются).

- Если анализу подвергается верхнее событие последовательности, то генерируются МСО для верхнего логического элемента успеха. Верхний логический элемент успеха - NOR-логический элемент, который является входным для верхнего логического элемента последовательности. Этот NOR-логический элемент имеет все функциональные события, которые являются успешными по последовательности, как входы. При этом в некоторых последовательностях не имеется успешных функциональных событий и, следовательно, не имеется верхнего логического элемента успеха. При генерации МСО для этого верхнего логического элемента успеха он обрабатывается по схеме «ИЛИ». Полученные МСО сохраняются как набор AND-модулей - входов в большой OR-модуль. Это называется «Успешный MCS-модуль».

- Квантификация (расчет вероятностных показателей надежности (безопасности) модулей) по «Успешным MCS-модулям». При квантификации успеха МСО результат – вероятность

того, что один или большее количество этих функциональных событий - сбой, Q . Нас интересует дополнение к Q (успех) $= 1 - Q$.

- Вычисление вероятностного показателя верхнего события (неготовности или частоты) с учетом результатов вычисления вероятностных показателей модулей. При этом шаге могут быть использованы различные типы аппроксимаций. Если это - верхнее событие последовательности, это - частота последовательности вычисляется без учета успехов функциональных событий. В выводе программы этот результат называется Q (неудача).

- Вычисление конечного результата последовательности по выражению $Q_{TOP} = Q(\text{неудача}) * Q(\text{успех})$.

- Демодуляция (разворачивание) модулей в МСО. В результате выполнения этого шага генерируется список МСО, в котором все элементы сечений представлены базисными событиями. Это может приводить к существенному увеличению числа сечений по сравнению со списком МСО, построенным из модулей. Поэтому при этом шаге применяется отсечение, которое служит, чтобы ограничить число МСО до разумного количества.

- Сортировка МСО или по неготовности / частоте или по числу элементов, входящих в сечения (порядку сечений).

- Запись результат расчета вероятностного показателя верхнего события (неготовность / частота) и список МСО в файл результата.

1.3.7.2. Формирование структуры дерева

Построение ДО ведется последовательно сверху вниз – от верхнего события до базисных элементов. После окончания построения дерева производится анализ заданных внешних условий (Истина, Ложь, Не определено). На основании этого анализа структура ДО модернизируется, путем удаления ветвей первоначального ДО.

При выполнении анализа последовательностей или последствий, то есть тогда, когда используются деревья событий, программа автоматически преобразовывает логику дерева событий в эквивалентную логику дерева отказов. При этом программа принимает во внимание состояния успеха событий в последовательностях. Это делается путем использования отрицательной логики в структуре дерева, которую программа создает, основываясь на деревьях событий. Логика модели, используемая программой для исследований дерева событий, обрабатывается следующим способом:

Каждая последовательность преобразуется в эквивалентную конструкцию дерева отказов со схемой «И» наверху. Этот логический элемент называется «верхний логический элемент последовательности».

Входами к верхнему логическому элементу последовательности служат:

- Функциональные события, входящие в последовательность, с неуспешными исходами.

- NOR-логические элементы со всеми функциональными событиями, входящими в последовательность, с успешными исходами.

При этом события, для которых задано состояние «не значимо» в последовательности не включаются.

Для каждого дерева событий, включенного в анализ (всегда одно ДС в случае анализа последовательности и одно или более в случае анализа последствий), программа создает схему «ИЛИ» со всей сопутствующей последовательностью схемы «И» от этого дерева событий, как вход. Тогда схема «И» создается с этой схемой «ИЛИ», как входом, наряду с исходным событием. Верхняя схема «И», созданная таким образом, называется «верхний логический элемент дерева событий».

Для верхнего события последствия, все верхние логические элементы дерева событий есть входы в схему «ИЛИ».

Для деревьев событий, которые имеют исходное событие, определенное как последствие, программа создает конструкцию верхнего последствия таким же образом, как описано выше и затем использует верхний логический элемент этого дерева, как исходное событие.

Когда технические требования верхнего события и логика дерева событий преобразованы в дерево отказов, как описано выше, остальная часть МСО-анализа выполняется таким же образом, как и для деревьев отказов.

1.3.7.3. Вычисление неготовностей основного события

Неготовность рассчитывается и сохраняется для каждого основного события (для основных событий типа «частота» (тип 5) частота сохраняется вместо неготовности).

Вычисление неготовностей основного события делается в зависимости от заданного типа вычислений:

Тип вычисления: средняя неготовность

Неготовность для каждого основного события рассчитывается стационарного коэффициента неготовности. Эти средние неготовности затем используются как неготовности в дальнейших вычислениях для модулей, наборов сечений и верхнего события. Этот тип вычисления наиболее широко применяется в ВАБах атомных электростанций. Должно быть указано, однако, что он не совсем правилен, поскольку не дает правильной оценки средней неготовности верхнего события, когда в модель включены основные события с моделью 2 (периодически проверяемый). Например, средняя неготовность двух связанных по схеме И основных событий при этом выше, чем произведение средней неготовности для двух отдельных основных событий. Также влияние шахматного испытания (различное время до первой проверки - TF - для избыточных компонентов) не принято во внимание в этом типе вычисления средней неготовности. Ошибки, сделанные из-за этих упрощений, однако, обычно достаточно малы по сравнению с общей неопределенностью в ВАБ, результатами учета отказов по

общей причине и т.д. Если нужны точные результаты, используют специальный модуль анализа зависимости от времени, чтобы вычислить среднюю неготовность верхнего события.

Тип вычисления: зависимость от времени неготовность

Неготовность для каждого компонента рассчитывается в точке времени, указанной в технических требованиях анализа МСО. Неготовность верхнего события также рассчитывается в этом указанном моменте времени.

Тип вычисления: частота

При этом типе вычислений неготовности основного события рассчитываются, как при *вычислении средней неготовности*. Должны иметься основные события типа частоты (тип 5) в модели и если сечения с больше чем одним событием частоты сгенерированы, эти сечения удаляются.

1.3.7.4. Реструктурирование и модуляризация дерева отказов

В целях упрощения генерации наборов МСО выполняется несколько типов модификаций дерева отказов:

- объединение логических операторов идентичного типа.
- нахождение и создание модулей.
- разложение К/N-логических элементов.
- минимизация логических элементов на основе правил булевой алгебры.

Объединение логических операторов идентичного типа.

Если имеется схема «ИЛИ» или «И» (логический оператор G1), которая является входом другого логического оператора того же самого типа (логический оператор G2) и логический оператор G1 встречается только в одном месте дерева, то логический оператор G1 может быть удален, а его входы могут быть добавлены к входам «отца» логического оператора G1 – оператору G2.

Этот шаг уменьшает число логических элементов в дереве, делает поиск модулей (см. ниже) более эффективным и увеличивает скорость генерации набора сечений.

Поиск и создание модулей.

Модуль определяется, как поддерево (логический оператор с его полной подструктурой), которое удовлетворяет следующим правилам:

- Все составляющие его события являются или базисными событиями или другими модулями.
- Все составляющие его события встречаются в дереве отказов только по одному разу.

Из этого определения следует, например, что все дерево отказов может быть модулем, если все события в дереве отказов встречаются только однажды. При этом, не смотря на то что, хотя все входы в модуле должны встречаться только однажды, сам модуль может находиться во многих места дерева.

Модули находят, применяя несколько методов. Отдельные логические элементы в ДО могут быть непосредственно идентифицированы и помечены как модули. Такие модули легко находятся. Другие модули могут быть созданы путем изменения ДО и прибавления новых логических элементов (которые помечаются как модули).

Модули это специальный тип логического элемента, Типы логических операторов, которые могут быть модулями: схемы «ИЛИ», «И» и К/Н.

Разложение К/Н-логических элементов.

Каждый К/Н-логический элемент может быть разложен в эквивалентную комбинацию схемы «ИЛИ» со множеством схем «И» в качестве входов. Это разложение делается на этой стадии, потому что это упрощает дальнейшую обработку дерева.

Как указывалось выше, модули могут также иметь К/Н-тип, и такие К/Н-модули также разлагаются на ИЛИ - и И-модули таким же образом.

Минимизация логической функции на основе правил булевой алгебры

При минимизации логической функции применяются следующие правила:

Схемы «ИЛИ» проверяются на предмет наличия какого-либо входа по схеме «И» к логическому элементу, который может быть удален, применяя Булев закон поглощения:

$$A + A * B = A.$$

Это происходит, если любой из входов схемы «И» также является прямым входом со схемой «ИЛИ».

Схемы «И» проверяются на предмет наличия каких-либо входов по схеме «ИЛИ», которые могут быть удалены, потому что все ее входы приведут к не минимальным наборам сечений, когда объединяются с другими входами схемы «И». Это происходит, если любой из входов схемы «ИЛИ» также оказывается прямым входом схемы «И». Это выполняется последовательным приложением Булевых законов:

$$A * A = A, \quad \text{и} \quad A + A * B = A$$

1.3.7.5. Обработка модулей

Модули в дереве отказов находят, применяя следующие три шага:

- Поиск логических операторов, которые имеют в качестве входов только основные события или другие, уже найденный, модули. Если все эти входы встречаются в дереве отказов только однажды, то этот логический элемент является модулем. Поиск модулей делается снизу (от основания дерева) вверх.
- Поиск таких логических операторов среди схем «ИЛИ» и «И», которые имеют два или больше исходных событий, которые происходят только однажды и являются основными событиями или уже найденным модулем. Если такие события находятся ниже логического элемента G1, создается новый модуль М (логический элемент, помеченный как модуль) с этими событиями в качестве входов. Входы, которые включены под модулем М удаляются

из логического элемента G1 и заменяются модулем M. Тип (ИЛИ или И) модуля M - тот же, что и у логического элемента G1.

- Поиск среди схем ИЛИ - и «И» таких комбинации исходных событий, которые всегда происходят вместе под логическими элементами одного типа. Если такие комбинации событий найдены, они могут быть объединены, чтобы сформировать новые модули, подобные модулям, описанным выше в пункте 2.

1.3.7.6. Генерация множеств минимальных сечений

После реструктуризации и построения ДО из модулей и окончания расчетов неготовности для всех основных событий и модулей начинается генерация МСО. В основном генерация наборов сечений делается согласно нисходящему алгоритму, который начинается созданием набора сечений с верхним логическим элементом, как единственным. Этот верхний логический элемент затем заменяется его входами. Если логический элемент - схема «И», то все ее входы добавляются к набору сечений, увеличивая число элементов в наборе. Если логический элемент - схема «ИЛИ», то создаются новые наборы сечений, по одному для каждого входа к схеме «ИЛИ». Эти новые наборы сечений подобны первоначальному, но со схемой «ИЛИ», замененной одним из ее входов. Этот процесс замены выполняется до тех пор, пока все элементы набора сечений не станут или основными событиями или модулями.

Основные принципы этого алгоритма известны и понятны, были описаны во многих книгах и статьях по анализу ДО. В первоначальной форме этот алгоритм очень неэффективен для ДО большого размера. Причиной является то, что он генерирует **все** МСО ДО (в форме функций булевой алгебры). Дело в алгоритме, который увеличивает размер набора сечений для схем «И» и увеличивает число наборов сечений для схем «ИЛИ», как объяснено выше. Это ведет к большому количеству генерируемых наборов сечений.

Значительно эффективнее другой способ: число наборов сечений рассчитывается, начиная от основания дерева, для каждого логического элемента с прибавлением числа наборов сечений для всех входов для схем «ИЛИ» и умножением числа наборов сечений для всех входов для схем «И». Основные события (или модули) рассчитываются как 1. Число, полученное для верхнего логического элемента таким образом, обычно упоминается как число Булевых обозначенных наборов сечений (BICS) и быстро становится чрезвычайно высоким в больших и сложных деревьях отказов (типично в пределах от нескольких миллионов до $1E+500$ (!) в исследованиях безопасности АЭС).

Наборы сечений, сгенерированные этим алгоритмом - не конечный продукт, потому что они **не минимальны**. В дереве отказов, содержащем повторные события, этот алгоритм обычно производит много не минимальных наборов сечений. Процесс устранения этих не минимальных наборов сечений может отнимать очень много времени.

Хотя основные принципы генерации набора сечений в Risk Spectrum такие же, как вышеописанные, программа имеет много особенностей, который, вместе взятые, чрезвычайно эффективно генерируют наборы минимальных сечений. Не минимальные наборы сечений генерируются в намного меньшей степени, чем в первоначальном алгоритме и если они сгенерированы, то процесс устранения очень эффективен.

Булевы законы, используемые при генерации набора сечений

В руководстве по теории не раскрывается ноу-хау алгоритма генерации МСО. Вместо этого описаны правила использования при этом законов алгебры логики. Эти правила достаточно просты и применяются на трех этапах генерации МСО:

Булевы законы, применяемые к каждому набору сечений

При каждом изменении набора сечений (сложение / замена нового события) применяются следующие Булевы законы:

- a) $A * A = A$
- b) $A * /A = 0$ ($/A = \text{NOT } A$)

Кроме того не сохраняются в наборах сечений дополненные события. Их единственная польза - действовать по логике в соответствии с Булевым законом b) выше. Результат этого - наборы сечений, которые содержат и событие и его дополнение устраняются.

Проверка того, является ли набор сечений минимальным, когда его генерация закончена

Когда все элементы набора сечений являются или основными событиями или модулями из множества МСО удаляется какое-либо событие. Затем этот новый набор событий проверяется, чтобы выяснить, происходит верхнее событие или нет. Если верхнее событие происходит, значит набор сечений не минимален (потому, что одно событие было удалено из набора, а верхнее событие все еще происходит). Если верхнее событие не происходит, тот же самый процесс повторяется, но теперь со вторым событием в удаленном наборе сечений. Это продолжается, пока набор сечений не станет не минимальным или пока все события не будут удалены по одному, и в каждом случае верхнее событие не будет происходить. В последнем случае, набор сечений минимален и сохраняется.

Проверка того, что набор минимальных сечений - не дубликат

Если набор сечений выявлен как минимальный, согласно шагу 2, он может все еще быть дубликатом, то есть тот же самый набор минимальных сечений уже был сгенерирован. Это проверяется путем сравнения только что сгенерированного МСО со всеми предварительно сгенерированными МСО. Если он не найден в существующем списке МСО, то он добавляется к списку.

Генерация МСО для верхних событий последовательностей

Для верхних событий последовательностей выполняются некоторые дополнительные шаги, включенные в процесс генерации МСО (и в процесс квантификации этих МСО).

- Программа сначала определяет, имеются ли в последовательностях какие-либо успешные функциональные события. Это делается путем определения местонахождения верхнего логического элемента успеха (NOR-логический элемент со всеми успешными функциональными событиями в последовательности как входами).

- МСО генерируются для верхнего логического элемента последовательности точно тем же путем, как для любого другого верхнего события. Из-за верхнего логического элемента успеха (NOR-логический элемент со всеми успешными функциональными событиями в последовательности как входами), список МСО, который генерируется, не содержит никаких МСО, которые являются логически противоречивыми. Другими словами, программа устраняет все МСО, которые не могут происходить, потому что некоторые функциональные события успешны.

- Если не имеется никаких успешных функциональных событий в последовательности, то генерация МСО заканчивается. Если верхний логический элемент успеха найден, программа генерирует МСО для этого верхнего логического элемента успеха. В этом процессе логический элемент обрабатывается как схема «ИЛИ». МСО, которые произведены - комбинации, которые приводят к отказу одного или большего количества успешных функциональных событий. Нас интересует дополнение этого верхнего события, так что квантификация (более поздний шаг) фактически вычисляет вероятность события дополнения.

- Список успешных МСО максимизируется до 1000 МСО. Кроме того при производстве этих МСО используются специальные значения отсечения (см. раздел «Процедура Отсечения»).

- МСО для верхнего логического элемента успеха сохраняются отдельно. Они также сохраняются в двоичном файле МСО (расширение .CSB) который используется во всех других типах исследований (неопределенность, значимость, зависимость от времени). Это означает, что успешные МСО определены количественно в этих исследованиях также.

Процедура отсечения

Для уменьшения объема вычислений при генерации МСО применяется процедура отсечения (усечения) МСО. В Risk Spectrum используются два основных способа отсечения:

- отсечение в соответствии с заданной величиной вероятности реализации сечения (абсолютным значением отсечения ACUTM или относительным значением отсечения RCUTM).

- отсечение в соответствии с порядком сечений. В этом случае все наборы сечений, содержащие большее количество событий, чем указанные этим значением отсечения, будут отброшены.

Вероятностное отсечение

Вероятностные значения отсечения можно задавать двумя способами:

- задавая величину абсолютного значения отсечения (ACUTM), например, 1.0 E-15.
- задавая величину относительного значения отсечения (RCUTM), например, 1.0 E-4.

Оба эти значения могут лежать в диапазоне от 0.0 до 0.999. Может быть использована любая комбинация абсолютных и относительных значений отсечения.

Задание абсолютного значения отсечения приводит к тому, что все наборы сечений, имеющие величину Кнг (или частоты) ниже, чем это значение отсечения отбрасываются при генерации множества МСО.

Относительное значение отсечения RCUTM используется следующим образом: После окончания генерации МСО программа вычисляет неготовность / частоту для каждого набора минимальных сечений, которые найдены. Поскольку МСО найдены и сохранены, может быть рассчитана сумма их неготовностей / частот. Эта сумма, QSUM, является приближенной верхней границей для неготовности / частоты верхнего события. Относительное значение отсечения RCUTM используется, чтобы вычислить новое (абсолютное) значение отсечения, которое связано с QSUM:

$$\text{Значение отсечения} = \text{RCUTM} \times \text{QSUM}$$

В качестве величины значения отсечения, используемом при усечении МСО используется самое большое значение из ACUTM или (RCUTM x QSUM).

Вероятностное отсечение используется в следующих случаях:

- Числовые данные и модели вычисления должны существовать для всех основных событий в дереве отказов
- Числовые вычисления верхнего события выполняются
- Список наборов минимальных сечений в файле результатов сортируется согласно неготовности / частоты для каждого набора сечений

Отсечение при генерации успешных МСО

При производстве МСО для верхнего логического элемента успеха в верхних событиях последовательности используется специальный набор значений отсечения:

$$\text{ACUTM} = 1.0\text{E}-6$$

$$\text{RCUTM} = 1.0\text{E}-3$$

Это - довольно сильное отсечение, но нужно помнить, что цель производства этих МСО состоит в нахождении вероятности успеха, когда он незначительно меньше 1. Другими словами, вероятность отказа (на котором МСО и отсечение основаны) - достаточно высока (по крайней мере относительно 1.0E-2), иначе это не важно.

Отсечение в соответствии с порядком сечений

Отсечение в соответствии с порядком используется, если значение отсечения $ACUTM \geq 1$. В этом случае все наборы сечений, содержащие большее количество событий, чем указанное этим значением отсечения $ACUTM$, будут отброшены.

Отсечение в соответствии с порядком МСО используется в следующих случаях:

- Числовые данные и модели вычисления не нужны для основных событий
- Числовые вычисления верхнего события не выполняются
- Список наборов минимальных сечений в файле результата сортируется согласно порядку набора сечений (длины набора сечений) для каждого набора сечений

Отсечение в соответствии с порядком фактически осуществляется как специальный тип вероятностного отсечения следующим способом: Всем основным событиям назначается вероятность отказа, равная 0.1, и значение отсечения тогда устанавливается внутри программы $1E-1$ для порядка 1, $1E-2$ для порядка 2, $1E-3$ для порядка 3 и т.д. Если выбрано отсечение в соответствии с порядком МСО, то квантификация верхнего события не выполняется.

Окно задания порога отсечения сечений при генерации МСО представлено на рис.3.6

Вычисление ошибки отсечения

Вычисление ошибки отсечения выполняется только при использовании вероятностного отсечения. При применении процедуры отсечения конечный список МСО не является полным отражением логики дерева отказов. Некоторые из наборов сечений отбрасываются (обрезаются) вследствие отсечения. В результате появляется «ошибка отсечения» (ошибка отбрасывания), связанная с квантификацией наборов сечений. Верхняя граница для этой ошибки отсечения оценивается Risk Spectrum.

Оценка ошибки отсечения делается следующим способом: - Программа всегда обновляет текущую неготовность для набора сечений, с которым работает в данный момент. В определенной стадии разработки, этот набор сечений может состоять из смеси основных событий, модулей и логических элементов. Неготовность основных событий и модулей известна, тогда как неготовность логических элементов не известна. Текущая неготовность набора сечений рассчитывается как произведение неготовностей основных событий и модулей. Неготовность логических элементов, таким образом, предполагается равной 1. Это конечно консервативно и обычно - очень завышенная оценка.

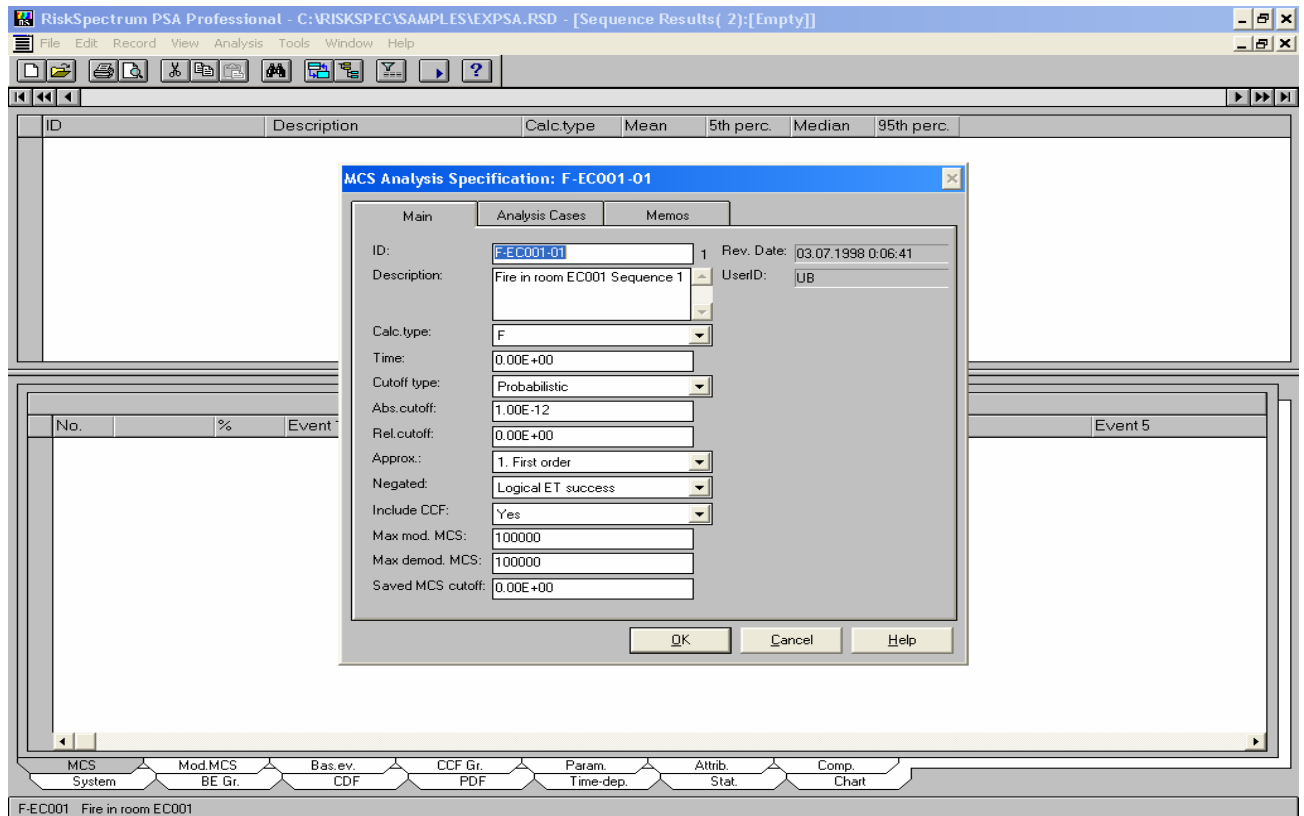


Рис. 3.6. Окно задания порога отсечения сечений при генерации МСО

- Если текущая неготовность набора сечений, как описано выше, является более низкой чем значение отсечения, набор сечений отбрасывается. Это может значительно сократить объем вычислений, потому что разработка оставшихся логических элементов в наборе сечений уже не будет выполняться.

- При отказе от набора сечений, как описано выше, текущая неготовность добавляется к переменной, которая является оценкой верхней границы ошибки отсечения, то есть суммы неготовностей всех отвергнутых наборов сечений.

Величина ошибки отсечения консервативна по двум причинам. Первая: логические элементы, для которых принята неготовность, равная 1, обычно имеют реальную неготовность, которая намного ниже 1. Вторая: отвергнутые наборы сечений не обязательно минимальны (большое количество их, вероятно, не минимально). Не минимальные наборы сечений действительно не должны быть включены в ошибку отсечения.

В большинстве случаев значение отсечения может быть откорректировано так, чтобы верхняя граница ошибки отсечения была только малой долей неготовности верхнего события. Когда дерево отказов чрезвычайно большое и/или сложное, значение отсечения приходится устанавливать таким, что ошибка отсечения становится достаточно большой (в некоторых случаях сравнимой или даже выше, чем неготовность верхнего события). Это при-
 скорбно, но к сожалению очень трудно преодолимо. С известными в настоящее время алгоритмами не остается ничего делать с этим, кроме как увеличить число наборов сечений, ко-

торые могут быть обработаны программой (которая учтет более низкие значения отсечения). Это, с другой стороны, может вызвать проблемы с памятью на персональных компьютерах. Будущие версии смогут обеспечить лучшую характеристику в этом отношении.

Нужно помнить, однако, что ошибка отсечения обычно **чрезвычайно** переоценивается, во многих случаях в 10-100 раз и, возможно, даже больше. Не имеется, к сожалению, точного метода, чтобы предсказать насколько завышена оценка. Это должно делаться из раза в раз аналитиком, например, путем изучения списка МСО. Если, скажем, первые 1000 наборов сечений напечатаны, и первые 100 явно доминируют, а остальная часть напечатанного множества МСО дает очень малый вклад, вероятно, что ошибка отсечения на самом деле является малой.

Автоматическое регулирование значения отсечения

Если в ходе генерации наборов сечений число построенных из модулей наборов сечений превышает указанный пользователем максимум или если ПК вышел за пределы памяти, значение отсечения автоматически увеличивается программой. Эта процедура регулирования отсечения работает следующим образом:

1. Вероятностное отсечение

Если текущее значение отсечения меньше, чем $1.0E-6$ от суммы неготовностей (или частот) всех МСО, сгенерированных таким образом (QSUM), значение отсечения корректируется, чтобы быть $1.0E-6 \times QSUM$

Во втором случае значение отсечения устанавливается так, чтобы быть на коэффициент $10^{1/2}$ (квадратный корень 10) выше чем текущее значение отсечения. Это означает, что две последовательных операции приведут к увеличению значения отсечения в 10 раз.

2. Отсечение по порядку набора сечений

Порядок отсечения уменьшается на один.

Процесс регулирования отсечения будет повторяться, пока результат не будет получен. Таким образом, выполнение программы никогда не заканчивает из-за «слишком большого количества сечений».

Каждый раз при регулировании значения отсечения в файл журнала анализа пишется сообщение в виде «значение отсечения увеличилось до ...». Конечное значение отсечения также пишется в файл результата.

Применяется один и тот же тип процедуры независимо от введения абсолютных или относительных значений отсечения (или любой комбинации). Всегда используется абсолютное значение отсечения. Разница только в том, что когда задано относительное отсечение изменяется величина порога абсолютного отсечения, поскольку большее количество МСО будет найдено.

В ходе процесса демодуляризации число МСО может также превысить максимальный предел. Если это имеет место, то применяется тот же самый тип регулирования отсечения. В этом случае, однако, отсечение не может иметь никакого влияния на числовые результаты (так как квантификация уже была сделана на основе построенных из модулей МСО). Информация относительно этого типа регулирования отсечения также пишется в файл журнала.

Рекомендации для выбора порога отсечения

Для вероятностного отсечения может быть использована любая комбинация абсолютного отсечения ACUTM и относительного отсечения RCUTM. Вообще, хорошо подобранное абсолютное отсечение более эффективно, чем относительное отсечение (то есть ведет к более короткому времени выполнения). Однако, когда деревья отказов очень сложны, не просто выбрать «оптимальное» абсолютное значение отсечения, которое ведет и к короткому времени выполнения и к приемлемо низким ошибкам отсечения. В таких случаях может быть легче использовать относительную ошибку отсечения. Как правило, относительные значения отсечения $1E-5$ - $1E-4$ дадут разумно низкие ошибки отсечения.

В крупномасштабном ВАБ обычно рекомендуется использовать следующие значения:

Абсолютное значение отсечения, ACUTM: $1.0E-12$ - $1.0E-15$

Относительное значение отсечения, RCUTM: $1.0E-3$ - $1.0E-5$

Эти параметры порога отсечения будут обеспечивать хорошее равновесие между точностью результатов (низкая ошибка отсечения) и временем выполнения программы. Более высокие значения отсечения рекомендуются в главной рабочей фазе ВАБ, в то время как модель развивается и выполняется много расчетов, чтобы проверить модель и получить предварительные результаты. В этой стадии более важна быстрота, чем низкие ошибки отсечения. Более низкие значения отсечения рекомендуются для вычисления конечных результатов.

Преимущество комбинации низкого абсолютного значения отсечения и немного «более резкого» относительного значения отсечения - то, что та же самая установка отсечения может быть применена ко всем верхним событиям с хорошими результатами.

1.3.8. Квантификация МСО

Квантификация верхнего события выполняется в ходе следующих этапов расчета:

Вычисление неготовности каждого основного события

Вычисление неготовности событий ООП

Вычисление неготовности модулей

Вычисление неготовности каждого МСО

Вычисление неготовности / частоты верхнего события на основе формулы, которая «подводит итог» неготовностям / частотам всем МСО

Шаги 1, 2 и 3 фактически делаются перед началом процесса генерации набора сечений, потому что соответствующие числовые значения необходимы при реализации отсечения.

При выполнении шага 5 могут быть применены несколько различных методов. В Risk Spectrum могут быть выбраны три различных уровня аппроксимации, называемые аппроксимацией *первого*, *второго*, и *третьего* порядка. Названия даны в соответствии с тем, что различные аппроксимации рассматривают члены *первого* порядка, *второго* порядка, и *третьего* порядка, соответственно.

Квантификация основных событий

Неготовности для основных событий рассчитываются в соответствии с формулами, описанными выше. Способ вычислений определяется заданием *типа вычислений* в технических требованиях анализа МСО:

Таблица 3.10.

Тип вычисления неготовности	Обозначение
Среднее значение	Q_{mean}
Функция времени	$Q(T)$
Частота	Q_{mean}

Квантификация ООП

Квантификация событий CCF делается согласно вышеприведенным формулам. «Полная неготовность компонента» Q_{tot} , использованная в этих формулах, является или зависимой от времени неготовностью $Q(T)$ или средней неготовностью Q_{mean} , в зависимости от выбора типа вычисления в технических требованиях МСо-анализа:

Таблица 3.11.

Тип вычисления неготовности	Обозначение
Среднее значение	$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{mean}}$
Функция времени	$Q_{\text{tot}} = Q(T)$
Частота	$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{mean}}$

Когда рассчитывается неготовность $Q(T)$ для ООП при задании периодически проверяемой модели надежности, параметры времени до первой проверки обрабатываются так, как описано в разделе «Квантификация CCF для шахматного испытания».

Квантификация модулей

После расчета характеристик надежности основных событий и ООП могут быть рассчитаны неготовности модулей.

Модуль может состоять из основных событий, событий ООП, других модулей или любой смеси из этих элементов, как прямых входов. Модули рассчитываются в «восходящем» порядке. Модуляризация делается таким образом, что базисные события типа «часто-

та» (тип 5) не могут входить в модули, так как модульные вычисления не предназначены для таких расчетов.

В формулах для модульной квантификации использована следующая система обозначений:

Таблица 3.12.

Q_i	Неготовность входа i , (основное событие, событие ООП или другой модуль)
k	Число входов в модуль

Порядок расчетов определяется выбором *типа вычисления* в технических требованиях МСО-анализа:

Таблица 3.13.

Тип вычисления неготовности	Обозначение
Среднее значение	$Q_i = Q_{\text{mean}}$
Функция времени	$Q_i = Q(T)$
Частота	$Q_i = Q_{\text{mean}}$

Вычисление неготовности для ИЛИ-модулей производится по формуле:

$$Q_{\text{mod}} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - Q_i) \quad (24)$$

Вычисление неготовности для И-модулей производится по формуле:

$$Q_{\text{mod}} = \prod_{i=1}^k Q_i \quad (25)$$

Эти формулы дают **точные** оценки величины неготовности (без аппроксимации) для всех ИЛИ-модулей и И-модулей за следующим исключением: Если модуль был первоначально К/Н-модулем, то он преобразуется в эквивалентную комбинацию ИЛИ- и И-схем. Это ведет к неточной оценке величины неготовности для К/Н-модулей, но очень хорошо аппроксимирована, если неготовности входов в К/Н-модуль низки (< 0.1).

Вычисление для К/Н-модулей опишем с помощью примера.

Предположим, что имеется логический элемент (G1 - 2/3) со входами А, В и С. Входы А, В, и С используются в дереве отказов только по одному разу, так что логический элемент G1 действительно модуль. Этот модуль преобразуем в OR-модуль с тремя И-модулями в качестве входов:

G1	ИЛИ	M1	M2	M3
M1	И	A	B	
M2	И	A	C	
M3	И	B	C	

После этого преобразования рассчитывается величина неготовности модулей путем использования формул для ИЛИ-модулей и И-модулей. Примем, что неготовность Q каждого события (A, B, C) равна 0.1 и получим следующие результаты:

$$Q(M1) = Q(M2) = Q(M3) = Q(A) * Q(B) = 0.1 * 0.1 = 0.01$$

$$Q(G1) = 1 - (1 - Q(M1)) * (1 - Q(M2)) * (1 - Q(M3)) = 0.297$$

Результат неточен, потому что после преобразования «модули» M1, M2 и M3 уже не являются модулями в строгом смысле слова вследствие наличия зависимостей между модулями M1, M2 и M3 (события A, B, C входят более чем в один модуль).

Квантификация наборов минимальных сечений

После расчетов показателей надежности основных событий, ООП и модулей может быть рассчитана величина неготовности или частоты каждого МСО.

Сечение может состоять из основных событий, событий ООП, модулей или любой смеси из них. В формулах для квантификации МСО использована следующая система обозначений:

Таблица 3.14.

Q_i	Неготовность элемента i в МСО (основного события, события ООП или другого модуля)
F_1	Частота основного события. Применяется только когда задан <i>тип вычисления – частота</i> . Имеется всегда точно одно событие с типом «частота» в каждом МСО для этих типов вычисления.
k	Число элементов (основные события, события ООП или модули) в МСО

Порядок расчетов определяется выбором *типа вычисления* в технических требованиях МСО-анализа:

Таблица 3.15.

Тип вычисления неготовности	Обозначение
Среднее значение	$Q_i = Q_{\text{mean}}$
Функция времени	$Q_i = Q(T)$
Частота	$Q_i = Q_{\text{mean}}$

Вычисление неготовности МСО производится по формуле:

$$Q_{MCS} = \prod_{i=1}^k Q_i \quad (26)$$

Вычисление частоты МСО производится по формуле:

$$F_{MCS} = F_1 \prod_{i=2}^k Q_i \quad (27)$$

Квантификация с минимальной верхней границей сечения (задается по умолчанию)

Нормальная аппроксимация первого порядка часто называется «аппроксимацией редких событий», потому что она дает неплохие результаты, если вероятности отказов малы.

В применении к МСО неготовность верхнего события, согласно аппроксимации редких событий, это просто сумма неготовностей МСО:

$$Q_{TOP,1} = \sum_{i=1}^n Q_{MCS,i} \quad (28)$$

Программа также вычисляет другую аппроксимацию, которая также является аппроксимацией «первого порядка», но дает несколько лучшие результаты, чем аппроксимация редких событий. Эта аппроксимация часто называется *минимальной верхней границей сечения*. Ее значение вычисляется по следующему выражению:

$$Q_{TOP,MCUB} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_{MCS,i}) \quad (29)$$

В обеих формулах $Q_{MCS,i}$ относится к неготовности MCS_i и эта неготовность является или средней неготовностью или функцией времени T , в зависимости от выбора типа вычислений в технических требованиях МСО-анализа.

Аппроксимация второго и третьего порядка

Вычисление аппроксимаций второго и третьего порядка основано на «Принципе включения-исключения». При использовании этого метода последовательно получают верхние и нижние границы вероятности верхнего события, вначале добавлением суммы всех членов первого уровня, затем вычитанием суммы всех членов со вторым порядком, затем добавлением всех членов с третьим порядком и так далее.

Поясним как работает метод на простом примере.

Пусть имеется множество МСО для системы «3 из 4». Обозначим компоненты системы буквами А, В, С, D. Имеем следующие МСО: А В С - А В D - А С D - В С D

К членам первого порядка относятся: $P(1) = P(ABC) + P(ABD) + P(ACD) + P(BCD)$

Примечание:

Эта формула использована для членов первого порядка только при использовании аппроксимации второго или третьего порядка. При выборе аппроксимация первого порядка программа использует минимальную верхнюю границу сечения.

Кроме того, если имеется два или больше МСО содержащих только по одному событию, то они перед выполнением вычислений комбинируются в своего рода «модуль». Для этого «модуля», минимальная верхняя граница сечения **точно** и «модуль» может быть обработан при дальнейших вычислениях так, как будто это отдельное базисное событие. Данное утверждение основано на допущении о независимости базисных событий..

Члены второго порядка:

$P(2) = P(MCS1 \& MCS2) + P(MCS1 \& MCS3) + P(MCS1 \& MCS4) + P(MCS2 \& MCS3) + P(MCS2 \& MCS4) + P(MCS3 \& MCS4) = P(ABCD) + P(ABCD) + P(ABCD) + P(ABCD) + P(ABCD) + P(ABCD) + P(ABCD)$

Члены третьего порядка:

$$P(3) = P(MCO1 \& MCO2 \& MCO3) + P(MCO1 \& MCO2 \& MCO4) + P(MCO1 \& MCO3 \& MCO4) + P(MCO2 \& MCO3 \& MCO4) = (ABCD) + P(ABCD) + P(ABCD) + P(ABCD)$$

Наконец, имеем различные аппроксимации для вероятности верхнего события согласно оценкам членов первого, второго и третьего порядка по принципу исключения-включения:

$$\text{Аппроксимация первого порядка (верхняя граница)} = P(\text{TOP1}) = P(1)$$

$$\text{Аппроксимация второго порядка (нижняя граница)} = P(\text{TOP2}) = P(1) - P(2)$$

$$\text{Аппроксимация третьего порядка (верхняя граница)} = P(\text{TOP3}) = P(1) - P(2) + P(3)$$

Рассчитаем вероятности верхнего события, приняв соответственно для всех компонентов равные вероятности отказа: 0.01; 0.1; 0.5 и 0.9. Результаты расчетов сведем в таблицу 3.16

Таблица 3.16.

№№ п/п	Pi	P(TOP1)	P(TOP2)	P(TOP3)	Точное значение	Min верхняя граница
1	0.01	4.000E-6	3.940E-6	3.980E-6	3.970E-6	4.00E-6
2	0.1	4.000E-3	3.400E-3	3.800E-3	3.700E-3	3.99E-3
3	0.5	0.50000	0.12500	0.37500	0.3125	0.4138
4	0.9	2.9160	-1.0206	1.6038	0.9477	0.9946

Как можно заметить из данных таблицы, последовательные верхние и нижние границы не обязательно монотонно сходятся. Это явление может обнаруживаться в Risk Spectrum, когда имеется более трех МСО (МСО-модулей) и когда вероятности реализации сечений очень высоки, т.о. аппроксимации первого, второго и третьего порядка не сходятся к истинному значению. Напротив, значения расходятся и иногда могут полностью не соответствовать истине (например, отрицательная аппроксимация второго порядка). Это плохо, но это - не признак ошибки в алгоритме Risk Spectrum; это - свойство данного метода.

Как можно заметить, все аппроксимации достаточно хороши, когда вероятности отказов малы (менее 0.01). Верхние и нижние границы довольно близки, когда вероятности - 0.1, давая довольно хорошую аппроксимацию. Границы все еще дают разумные результаты, когда вероятности отказа равны 0.5, даже при том, что аппроксимация довольно плоха в этом случае. Однако, когда вероятности отказа равны 0.9 аппроксимации дают полностью не соответствующие действительности числа. Достоинство этого метода в том, что можно быть уверенным, что результат первого порядка является верхней границей, результат второго порядка - нижней границей, и результат третьего порядка - верхней границей истинного значения. Это очень важно и дает, фактически, единственное правило, которое нужно помнить, когда приступаешь к принятию решений относительно достоверности результатов:

Если получены верхние и нижние границы, которые близки друг к другу, аппроксимация хороша; если границы далеки друг от друга, аппроксимация плоха. (Близость границ может меняться от случая к случаю).

Когда программа выполняет аппроксимацию второго и третьего порядка, она фактически применяет процедуру отсечения, чтобы ускорить вычисления. Дело в том, что число членов логической функции возрастает очень быстро. Приблизительно число членов второго порядка есть квадрат количества МСО, а число членов третьего порядка - куб числа МСО. Другими словами, для 1000 МСО число членов логической функции при аппроксимации третьего порядка составляет около $1 \text{ E}+9$. Это может приводить к весьма существенному увеличению времени расчетов. Дело в том, при генерации каждого нового члена логической функции используются законы алгебры логики для обработки наборов сечений, и лишь затем выполняются вычисления с плавающей точкой (расчет числовых показателей).

Процедура отсечения, используемая программой, применяется в целях уменьшения числа членов функции, которые учитываются программой. Работает данная процедура следующим образом:

Сначала рассчитывается и сохраняется число $M = 10 * N$, где N – количество МСО.

Затем рассчитываются значения порогов отсечения: $C1 = QTOP/M$ и $C2 = C1/M$, где $QTOP$ - минимальная верхняя граница сечения.

При дальнейших вычислениях каждое отдельное МСО объединяется со всеми другими МСО, создавая таким образом до $N-1$ членов второго порядка (первое МСО генерирует $N-1$ членов второго порядка, второе - $N-2$ новых членов и т.д.). Если вероятность реализации очередного МСО окажется ниже, чем значение отсечения $C1$, члены второго и третьего порядка, включающие комбинации с этим МСО, не рассчитываются. Максимальная теоретически возможная ошибка, получаемая при пренебрежении этими членами составляет $QTOP/M$, а максимальная ошибка в случае, если отсечение было бы применено ко всем МСО - меньше 10 % от $QTOP$.

Когда получен член второго порядка он объединяется с другими МСО, чтобы генерировать члены третьего порядка. Перед генерацией членов третьего порядка выполняется другая проверка на отсечение. В этом случае члены третьего порядка не рассматриваются, если текущий член второго порядка имеет вероятность, более низкую, чем $C2$. В самом плохом (теоретически) случае ошибка, полученная при этом, даже более низка, чем максимальная ошибка для членов второго порядка.

Разработчики ПК утверждают, что при решении практических задач описанная выше процедура отсечения не влияет на точность результатов. Однако ее влияние на время выполнения может быть весьма значительным.

Квантификация верхних событий последовательности

Как указывалось выше, для верхних событий последовательности программа генерирует МСО для так называемого верхнего логического элемента **успеха**. Список «успешных» МСО определяется путем использования минимальной верхней границы сечения. Если Q – неготовность, то вероятность успеха является обратной величиной:

$$Q(\text{успех}) = 1 - Q$$

Данный результат используется при вычислении частоты последовательности:

$$Q_{TOP} = Q(\text{отказ}) * Q(\text{успех})$$

При этой квантификации потенциальными зависимостями между «неудачными» МСО и «успешными» МСО пренебрегают. Это аппроксимация (приближение). Правильная квантификация должна фактически вычислить условное $Q(\text{успеха})$ возникновения «неудачного» верхнего логического элемента. Ошибка, полученная путем пренебрежения этой потенциальной зависимостью, дает консервативный результат. Это потому, что вероятность неуспеха Q (см. выше) недооценена (завышена), следовательно вероятность $Q(\text{успех})$ завышена.

1.3.9. Анализ неопределенности

При анализе неопределенности вычисляется распределение вероятности для результатов событий (в противоположность точечному значению, рассчитываемому в МСО-анализе). Анализ неопределенности основан на использовании метода Монте-Карло.

При анализе неопределенности для верхнего события выполняются следующие шаги:

Чтение технических требований к анализу неопределенности из записи параметров анализа.

Чтение МСО-модулей из двоичного файла результатов (с расширением .RSR).

Чтение из базы данных проекта данных для основных событий и параметров.

Методом Монте-Карло вычисляется неготовность верхнего события NSIM раз (NSIM - число итераций, заданное в технических требованиях). Каждый раз методом Монте-Карло рассчитываются все параметра надежности.

Распечатка в файл результатов полученного распределения неопределенности.

1.3.9.1. Технические требования анализа неопределенности

При задании технических требований анализа неопределенности определяются значения следующих параметров:

Таблица 3.17.

NSIM	Число итераций в процессе моделирования методом Монте-Карло. Рекомендуется задавать по крайней мере 1000 итераций.
------	--

Ав- то/Ручное начальное число	Моделирование Монте-Карло основано на использовании генератора случайных чисел, который нуждается в начальном (стартовом) значении. Если «Ав-то» выбрано, программа выбирает значение начального числа автоматически (случайное начальное число, расчетное для текущего времени). Если выбрано «Ручное», пользователь должен задать значение начального числа сам (см. ниже).
Началь- ное число	Ручное значение начального числа, если выбрано задание его вручную. Если используется одно и то же значение начального числа, то можно воспроизвести идентичные результаты в двух анализах неопределенности, потому что конкретное начальное число приводит к установленной последовательности псевдослучайных чисел.

1.3.9.2. Моделирование значений параметров

В процессе моделирования результат верхнего события рассчитывается NSIM раз. В каждой из итераций все параметры зациклены. Для каждого параметра моделируется распределения неопределенности значения параметра.

Моделирование выполняется следующим способом:

В ходе анализа генерируется случайное значение между 0 и 1, которое является моделируемой процентилью, то есть значением от ЧПЗ. Значение, используемое из распределения, получают по различным опубликованным алгоритмами для различных типов распределения.

1.3.9.3. Вычисление результатов верхнего события в процессе моделирования

Когда смоделированы все значения параметров рассчитывается значение вероятности верхнего события, основанное на этих значениях.

Все вычисления для основных событий, событий ООП, модулей и МСО согласно описанным выше правилам. Квантификация МСО всегда делается при использовании *аппроксимации минимальной верхней границы сечения* (аппроксимации первого уровня).

Вычисление неготовности для основных событий выполняется в соответствии с *типом вычислений*, выбранного в технических требованиях анализа МСО (среднее, функция времени, частота).

1.3.9.4. Сбор распределения неопределенности

Все NSIM смоделированных результатов оценки заданного параметра верхнего события сохраняются в специальном массиве программы. Этот массив затем сортируется и производится вычисление значений процентили и средние значения.

При этом используется следующая система обозначений:

Таблица 3.18.

$Q(i)$	Число примеров неготовности верхнего события i (в массиве всех NSIM смоделированных значений, то есть. $i = 1, 2, \dots, NSIM$)
Q_M	Среднее значение распределения значений Q
Q_X	Процентиль X распределения значений Q

Среднее значение рассчитывается как среднее арифметическое всех имитируемых неготовностей верхнего события:

$$Q_M = \sum_{i=1}^{NSIM} \frac{Q(i)}{NSIM} \quad (30)$$

Значения процентиля рассчитываются следующим способом (при этом массив Q(i) должен сортироваться в порядке возрастания):

$$Q_x = Q\left(\frac{X}{100} NSIM\right) \quad (50)$$

Чтобы получить график совокупной плотности распределения (CDF) используются следующие значения в файле результатов:

«Процентиль» / 100 как Y-значение

«Значение процентиля» как X-значение

Чтобы получить график функции плотности вероятности столбец «Плотность вероятности» дается в файле результатов. Это значение рассчитывается следующим способом:

$$Prob. density = \frac{P_i - P_{i-1}}{PV_i - PV_{i-1}} \quad (51)$$

где P_i – Процентиль i ,

PV_i - значение процентиля i в таблице.

После расчета всех значений PDF согласно вышеприведенной формулы, они нормируются так, чтобы их сумма была равна 1.

Значения PDF могут быть использованы для составления графика PDF (гистограммы) следующим способом:

PDF = 0 для X-значений ниже первого значения процентиля (процентиль 0)

PDF = второе значение PDF в X-интервале от первого значения процентиля до третьего значения процентиля

и т.д.

1.3.10. Анализ значимости и чувствительности

Назначение анализа значимости состоит в вычислении значимостей и специального типа меры чувствительности для:

отдельных базисных событий

групп основных событий, характеризуемых одним и тем же атрибутом

групп базисных событий, которые принадлежат одному компоненту

групп базисных событий, которые принадлежат одной системе

групп базисных событий, определенных в специальных группах основных событий, заданных в Risk Spectrum

групп ООП

отдельных параметров

Для каждой из этих категорий рассчитываются три различные меры значимости:

Дробный вклад

Значимости по Фусселю-Везели (только для базисных событий и событий ООП)

Фактор уменьшения риска (также известный как стоимость снижения риска)

Фактор увеличения риска (также известный как стоимость достижения риска)

Все вычисления для основных событий, событий CCF, модулей и МСО выполняются в соответствии с описанными ранее правилами. Квантификация МСО всегда выполняется при использовании *аппроксимацию минимальной верхней границы сечения* (первого уровня аппроксимации).

Вычисление неготовности для основных событий выполняется в соответствии с заданным *типом вычислений* (среднее, функция времени, частота).

Во всех таблицах значимости и чувствительности перечисляются (выводятся на распечатку) N наиболее важных элементов. Значение N задается в технических требованиях анализа значимости для отдельных базисных событий, атрибутов и параметров. Для групп базисных событий все заданные группы включаются в распечатку. Необходимо отметить, что всегда вычисляются **все** значения значимости каждого типа, N влияет только на объем распечатки.

1.3.10.1. Значимость для базисных событий

Значимость по Фусселю-Везели

Значимость по Фусселю-Везели (FV) для базисного события рассчитывается следующим образом:

Вычисляется неготовность верхнего события на основе только тех МСО, которые содержат данное событие (это аналогично установке неготовности, равной нулю, для всех МСО, *не* содержащих данное событие)

Вычисляется FV значимость как частное от деления неготовности, рассчитанной в соответствии с пунктом 1 и номинальной неготовностью верхнего события:

$$I_i^{FV} = \frac{Q_{TOP}(MCS \text{ including } i)}{Q_{TOP}} \quad (52)$$

Другие показатели значимости

Все вычисления значимости для базисных событий (индивидуальных или групп) выполняются, в основном, тем же способом:

неготовность для базисного события или для всех базисных событий в группе задается равной $Q = 0$, то есть принимается, что компонент абсолютно надежен. Для основного события с 5 типом модели надежности устанавливается частота $f=0$.

Вычисляется новый результат верхнего события (неготовность или частота, в зависимости от заданного типа вычислений). Этот новый, меньший, результат обозначается QTOP ($Q_i=0$).

Теперь могут быть рассчитаны:

- фактор уменьшения риска:

$$I_i^R = \frac{Q_{TOP}}{Q_{TOP}(Q_i = 0)} \quad (53)$$

- дробный вклад:

$$I_i^F = I - \frac{I}{I_i^R} \quad (54)$$

неготовность для базисного события или для всех базисных событий в группе задается равной $Q_i = 1$, то есть принимается, что компонент достоверно отказал. Эта операция делается для основных событий с 5 типом модели надежности.

Вычисляется новый результат верхнего события (неготовность или частота, в зависимости от заданного типа вычислений). Этот новый результат обозначен $Q_{TOP}(Q_i=1)$.

Теперь может быть рассчитан фактор увеличения риска:

$$I_i^I = \frac{Q_{TOP}(Q_i = 1)}{Q_{TOP}} \quad (55)$$

1.3.10.2. Значимость для групп основных событий

Значимость для групп основных событий рассчитывается таким же образом, как и для отдельных основных событий, но неготовности задаются равными $Q = 0$ и $Q = 1$ для **всех** событий, которые принадлежат группе на шагах 1 и 3.

1.3.10.3. Значимость для атрибутов

Значимость для атрибута это значимость группы базисных событий, которым присвоен признак этого атрибута. Поэтому, вычисление значимости для атрибутов выполняется так же образом как и для групп основных событий.

1.3.10.4. Значимость для параметров

Вычисление значимости для параметров производится в соответствии с той же процедурой, что и для основных событий. В отдельных случаях показатели значимости либо не могут быть определены, либо будут бессмысленными. Это относится к таким параметрам, как времена до первой проверки (T_1), фактор увеличения риска для частоты (f).

Для вычисления значимости параметра необходимо:

Установить значение параметра «лучший из всех теоретически возможных» (во всех случаях это $X=0$). Это относится ко всем типам параметров, кроме параметра времени до первой проверки (TF).

Вычислить новый результат вероятности осуществления верхнего события (неготовность или частота, в зависимости от заданного типа вычисления). Этот новый, меньший, результат обозначим как $Q_{TOP}(X=0)$.

Теперь фактор уменьшения риска может быть рассчитан с помощью формулы вида:

$$I_i^R = \frac{Q_{TOP}}{Q_{TOP}(X_i = 0)} \quad (56)$$

а дробный вклад - с помощью формулы вида:

$$I_i^F = I - \frac{I}{I_i^R} \quad (57)$$

Установить значение параметра «наихудший теоретически возможный». Это значение зависит от типа параметра, для вероятностных параметров это $q=1$ и $X=\infty$ для всех других параметров. Это неприменимо для параметров частоты, потому что бесконечное значение частоты подразумевало бы частоту верхнего события, равную бесконечности.

Вычислить новый результат верхнего события (неготовность или частота, в зависимости от заданного типа вычислений). Этот новый, больший, результат обозначим Q_{TOP} ($q_i=1$). Тогда фактор увеличения риска может быть рассчитан следующим образом.

а) для вероятностных параметров:

$$I_i^I = \frac{Q_{TOP}(q_i = 1)}{Q_{TOP}} \quad (58)$$

б) для всех других типов параметра X (кроме параметров частоты (f) и времени до первой проверки (TI), для которых вычисления не делаются):

$$I_i^I = \frac{Q_{TOP}(X_i = \infty)}{Q_{TOP}} \quad (59)$$

1.3.10.5. Вычисления показателей чувствительности

Все вычисления показателей чувствительности (для основных событий, для групп событий и для параметров) выполняются в основном одним и тем же способом:

Рассматриваемое значение ($я$) (неготовность, частота или параметр) устанавливается равным номинальному значению, деленному на фактор чувствительности. Фактором чувствительности может быть любое число большее 1. По умолчанию задается значение равное 10. Для групп основных событий номинальные неготовности делятся на фактор чувствительности для всех основных событий в группе.

Вычисляется новый результат верхнего события (неготовность или частота, в зависимости от заданного типа вычислений) - $Q_{TOP,L}$.

Рассматриваемое значение ($я$) (неготовность, частота или индивидуальное значение параметра) устанавливается равным номинальному значению, умноженному на фактор чувствительности. Для групп основных событий номинальные неготовности умножаются на 10 для всех основных событий в группе. Если какое-либо значение после умножения находится вне дозванного диапазона, то оно усекается до максимально допустимого значения. Вероятности, например, усекаются до 1.

Вычисляется новый результат верхнего события (неготовность или частота, в зависимости от заданного типа вычислений) - $Q_{TOP,U}$.

Вычисляется значение параметра, которое определяется как показатель чувствительности:

$$S = \frac{Q_{TOP,U}}{Q_{TOP,L}} \quad (60)$$

После этого программа записывает значения Q_{TOP} , L , Q_{TOP} , U и чувствительности S . Таблица результатов сортируется по величине S .

1.3.11. Выполнение анализа показателей надежности и безопасности как функции времени.

При анализе показателей надежности и безопасности как функций времени вычисляется распределение вероятности для исхода верхнего события.

При этом выполняются следующие этапы моделирования и расчета:

Из записи параметров верхнего события считываются технические требования анализа;

Из двоичного файла результатов (с расширением .RSR) считываются параметры МСО-модулей;

Из базы данных проекта считываются данные для основных событий и параметров; Создается массив всех моментов времени, которые будут использованы при дальнейших вычислениях. Способ создания массива зависит от выбора способа расчета промежуточных моментов времени в технических требованиях анализа: «Авто» или «Ручного».

Вычисления выполняются в цикле для каждого промежуточного момента времени. Так создается таблица результатов, в которой каждая строка соответствует определенному заданному моменту времени.

Вычисляются значения тех параметров, для которых необходимо интегрирование промежуточных значений для моментов времени, например, средние значения. Результаты печатаются в файл результатов.

1.3.11.1. Технические требования анализа показателей надежности и безопасности в функции времени

К техническим требованиям анализа зависимости от времени относятся:

Таблица 3.19.

TE	Максимальный рассматриваемый промежуток времени, используемый при вычислениях
Авто / Ручные	«Авто» означает, что программа автоматически вычисляет и рассматриваемый промежуток времени TE и моменты (интервалы) времени, для которых выполняются вычисления
NI	Число интервалов. Определяет моменты времени, для которых выполняется анализ

1.3.11.2. Расчет интервалов времени

При «ручном» задании параметров TE и NI моменты времени для расчетов определяются по формуле:

$$T_i = i \frac{TE}{NI} \quad i = 0, 1, 2, \dots, NI \quad (61)$$

При задании автоматического определения моментов времени это выполняется путем анализа заданных параметров базисных событий, включенных в МСО-анализ:

В цикле проверяются все базисные события 1-го и 2-го типа. Самое большое значение времени восстановления (TR) для событий 1-го типа умножается на пять и сохраняется как TE1. Самый большое значение интервала между проверками (TI) среди компонентов 2-го типа сохраняется как TE2. Большее из значений TE1 и TE2 присваивается параметру TE, «полным» интервалом. Если значение параметра TE в технических требованиях анализа превышает величину любого из параметров TE1 и TE2, то величина TE приравнивается к нему. Интервал TE делится на 100 подинтервалов.

В цикле анализируются все основные события 2-го типа. Для каждого из них прибавляются следующие моменты времени (если они еще не заданы):

- пять моментов времени для каждого цикла интервала между проверками до TE: Каждый интервал между проверками разделен на 4 подинтервала. Так генерируется 5 моментов времени, включая начальную и конечную точки интервала между проверками. Точка отсчета определяется так, чтобы она была сразу после испытания, а конечная точка - перед испытанием.
- если для базисного события заданы параметры TR и TF (время до первой проверки), то «местоположения» момента времени «перемещаются» к более высоким значениям, соответствующим значениям TR и TF. Кроме того, при задании TF специальный цикл интервала первой проверки определяется с 5 моментами времени так же, как было указано выше.

Максимальное число моментов времени - 32767.

1.3.11.3. Вычисление результатов верхнего события для каждого момента времени

Для каждого момента времени T рассчитываются следующие параметры верхнего события:

Таблица 3.20.

Q(T)	Неготовность в момент времени T. Вероятность того, что моделируемая система (верхнее событие) находится в состоянии отказа в момент времени T.
W(T)	Частота (безусловная интенсивность отказа) в момент времени T. Ожидаемое число отказов в единицу времени (обычно час) в момент времени T.
L(T)	Интенсивность (условная интенсивность отказа) в момент времени T. Ожидаемое число отказов в единицу времени (обычно час), упри условии что система находится в работоспособном состоянии непосредственно перед временем T.
E(0,T)	Ожидаемое число отказов на интервале 0 - T
F(T)	Вероятность по крайней мере одного отказа системы (верхнего события) на интервале 0 - T

Вычисление неготовности

Все вычисления неготовности для основных событий, событий ООП, модулей и МСО выполняются в соответствии с описанными ранее правилами. Квантификация МСО всегда делается при использовании *аппроксимации минимальной верхней границы сечения (первого порядка)*. Все вычисления выполняются для каждого из заданных моментов времени.

Вычисление частоты (безусловной интенсивности отказов)

Вычисление частоты (безусловной интенсивности отказов) $W(T)$ делается в той же последовательности, что и вычисление неготовности:

Вычисляется $W(T)$ для всех основных событий

Вычисляется $W(T)$ для всех событий ООП

Вычисляется $W(T)$ для всех модулей

Вычисляется $W(T)$ для всех МСО

Вычисляется $W(T)$ для верхнего события

Формулы для вычисления частоты $W(T)$ были приведены при описании моделей надежности базисных событий.

Вычисление частоты для событий ООП производится по формулам, описанным ранее, но значение Q_{tot} заменяется на W_{tot} , где W_{tot} рассчитывается так же, как определено для основных событий при использовании модели надежности группы ООП.

Как уже говорилось, модуль может содержать в своем составе основные события, события ООП, другие модули или любое сочетание этих элементов. Модули рассчитываются после расчета параметров всех основных событий и событий ООП последовательно в восходящем порядке. Модуляризация делается таким образом, что основные события моделью типа «частота» (тип 5) не могут быть частью модулей, так что модульные вычисления не должны иметь дело с такими событиями.

Вычисление частоты для модулей делается по следующим формулам:

- частота модуля ИЛИ (безусловная интенсивность отказов):

$$W_{\text{mod}}(T) = \sum_{i=1}^k W_i(T) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k (1 - Q_j(T)) \quad (62)$$

частота модуля И (безусловная интенсивность отказов):

$$W_{\text{mod}}(T) = \sum_{i=1}^k W_i(T) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k Q_j(T) \quad (63)$$

где:

- $Q_i(T)$ - неготовность в момент времени T входа i (основное событие, событие ООП или другой модуль) в модуль
- $W_i(T)$ - частота в момент времени T входа i (основное событие, событие ООП)

или другой модуль) в модуль

Частота набора МСО рассчитывается после расчета параметров основных событий, событий ООП и модулей с помощью следующего выражения:

$$W_{MCS}(T) = \sum_{i=1}^k W_i(T) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k Q_j(T) \quad (64)$$

где:

- $Q_i(T)$ - неготовность в момент времени T элемента i в МСО (i - базисное событие, событие ООП или другой модуль)
- $W_i(T)$ - частота в момент времени T элемента i в МСО
- k - число элементов в МСО

Вычисление результатов верхнего события

Результаты верхнего события рассчитываются на основе результатов, полученных после вычислений неготовности и частоты для МСО.

Неготовность в момент времени T для верхнего события рассчитывается согласно *аппроксимации минимальной верхней границы сечения* по формуле:

$$Q_{TOP}(T) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_{MCS,i}(T)) \quad (65)$$

Частота (безусловная интенсивность отказа) для верхнего события - ожидаемое число отказов в единицу времени в период $T + dt$ рассчитывается по формуле:

$$W_{TOP}(T) = \sum_{i=1}^k W_{MCS,i}(T) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k (1 - Q_{MCS,j}(T)) \quad (66)$$

где:

- $Q_{MCS,i}(T)$ - неготовность набора минимальных сечений i в момент времени T
- $W_{MCS,i}(T)$ - частота набора минимальных сечений i в момент времени T
- n - число наборов минимальных сечений

Интенсивность (условная интенсивность отказа) для верхнего события - ожидаемое число отказов в единицу времени в период $T + dt$ при условии, что непосредственно перед моментом времени T отказа нет рассчитывается по формуле:

$$L_{TOP}(T) = \frac{W_{TOP}(T)}{1 - Q_{TOP}(T)} \quad (67)$$

Ожидаемое число отказов на интервале от 0 до T получается интегрированием $W(T)$:

$$E_{TOP}(0, T) = \int_0^T W_{TOP}(t) dt \quad (68)$$

Интегрирование при вычислении $E_{TOP}(0, T)$ выполняется численно путем использования линейной аппроксимации между моментами времени, представленными в распечатке.

Вероятность по крайней мере одного отказа (ненадежность) на интервале от 0 до T рассчитывается по формуле:

$$F_{TOP}(T) = 1 - \exp\left(-\int_0^T L_{TOP}(t) dt\right) \quad (69)$$

Интегрирование при вычислении $F_{TOP}(0, T)$ выполняется численно путем использования линейной аппроксимации между моментами времени, представленными в распечатке.

Средняя неготовность рассчитывается интегрированием и усреднением по времени $Q(T)$:

$$Q_{TOP, mean} = \frac{1}{T} \int_0^T Q_{TOP}(t) dt \quad (70)$$

Интегрирование при вычислении $Q_{TOP, mean}(0, T)$ выполняется численно путем использования линейной аппроксимации между моментами времени, представленными в распечатке.

Если для верхних событий (системы) предусмотрено восстановление рассчитывается величина MTBF (средняя наработка между отказами):

$$MTBF_{TOP} = \frac{1}{W_{TOP}(t = \infty)} \quad (71)$$

Если для верхних событий (системы) восстановление не предусмотрено, то рассчитывается MTTF (средняя наработка до отказа):

$$MTTF_{TOP} = \int_0^{\infty} (1 - Q_{TOP}(t)) dt \quad (72)$$

Интегрирование в формуле для MTTF выполняется численно путем вычисления $Q_{TOP}(t)$ для большого количества моментов времени с коротким шагом и с линейной аппроксимацией между точками.

MTTR верхнего события (среднее время простоя (ремонта) при возникновении верхнего события) рассчитывается только если предусмотрено восстановление верхнего события (системы). Для этого используется следующая формула:

$$MTTR_{TOP} = \frac{Q_{TOP}(t = \infty)}{W_{TOP}(t = \infty)} \quad (73)$$

Примечание:

Все интегрирования, включенные в вычисление $E_{TOP}(0, T)$, $F_{TOP}(T)$ и $Q_{TOP, mean}$ выполняются численно, используя линейную аппроксимацию между моментами времени. Моменты времени, используемые в этих интегрированиях - те же самые моменты времени, исполь-

зуемые во всех других вычислениях, то есть моменты времени, представленные в распечатке.

Если эти моменты времени далеки друг от друга, то они могут давать очень плохое представление кривой. Численное интегрирование, выполненное программой, будет тогда плохой аппроксимацией.

Обычно рекомендуется использовать автоматический расчет моментов времени для всех случаев, где имеются базисные события 2-го типа (периодически проверяемые), чтобы удостовериться что программа использует моменты времени, дающие хорошее представление кривой. В тех случаях, когда любое из совокупных свойств важно, рекомендуется использовать ручное задание моментов времени со многими моментами времени.

Вычисление ошибки отсечения

Вычисление ошибки отсечения выполняется только при использовании вероятностного отсечения. При применении процедуры отсечения конечный список МСО не является полным отражением логики дерева отказов. Некоторые из наборов сечений отбрасываются (обрезаются) вследствие отсечения. В результате появляется «ошибка отсечения» (ошибка отбрасывания), связанная с квантификацией наборов сечений. Верхняя граница для этой ошибки отсечения оценивается Risk Spectrum.

Оценка ошибки отсечения делается следующим способом:

- Программа всегда обновляет текущую неготовность для набора сечений, с которым работает в данный момент. В определенной стадии разработки, этот набор сечений может состоять из смеси основных событий, модулей и логических элементов. Неготовность основных событий и модулей известна, тогда как неготовность логических элементов не известна. Текущая неготовность набора сечений рассчитывается как произведение неготовностей основных событий и модулей. Неготовность логических элементов, таким образом, предполагается равной 1. Это конечно консервативно и обычно - очень завышенная оценка.

**ГЛАВА 2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И
БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМО-
ЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ «RELEX», «АСМ», «RISK
SPECTRUM».**

2.1. Оценка надежности Системы электроснабжения (Задача № 35).

2.1.1. Описание задачи

Рассматривается система электроснабжения (СЭС) кольцевой структуры, состоящая из 15 элементов:

- 3-х генераторов одинаковой мощности (1, 2, 3);
- 3-х главных распределительных щитов ГРЩ (4, 6, 9);
- 3-х перемычек (5, 7, 8);
- 6-ти вторичных распределительных щитов ВРЩ (10, 11, 12, 13, 14, 15).

Система предназначена для обеспечения бесперебойного питания одновременно трех групп потребителей (П1, П2, П3). Мощности каждого генератора достаточно для обеспечения работы всех потребителей. Нет никаких ограничений по пропускной способности ни ГРЩ, ни перемычек между ними. Функциональная схема рассматриваемой системы электроснабжения представлена на рис. 2.1.1.

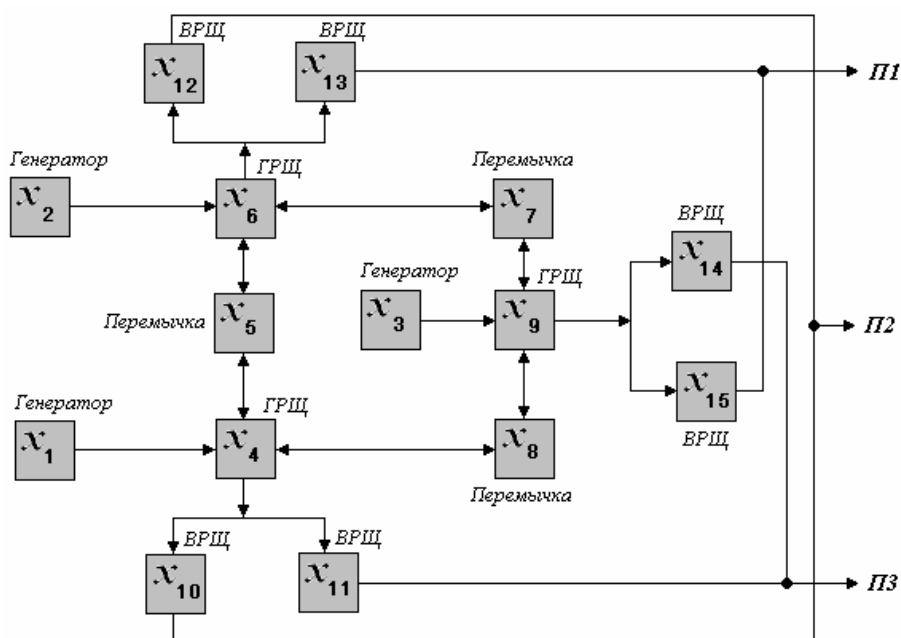


Рис.2.1.1. Функциональная схема системы электроснабжения

Необходимо рассчитать вероятность обеспечения питанием всех трех групп потребителей при варьировании показателей надежности элементов СЭС.

2.1.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

На рис.2.1.2 а). приведена блок-схема данной задачи, набранная в редакторе задания модели в программном комплексе Relex RBD .

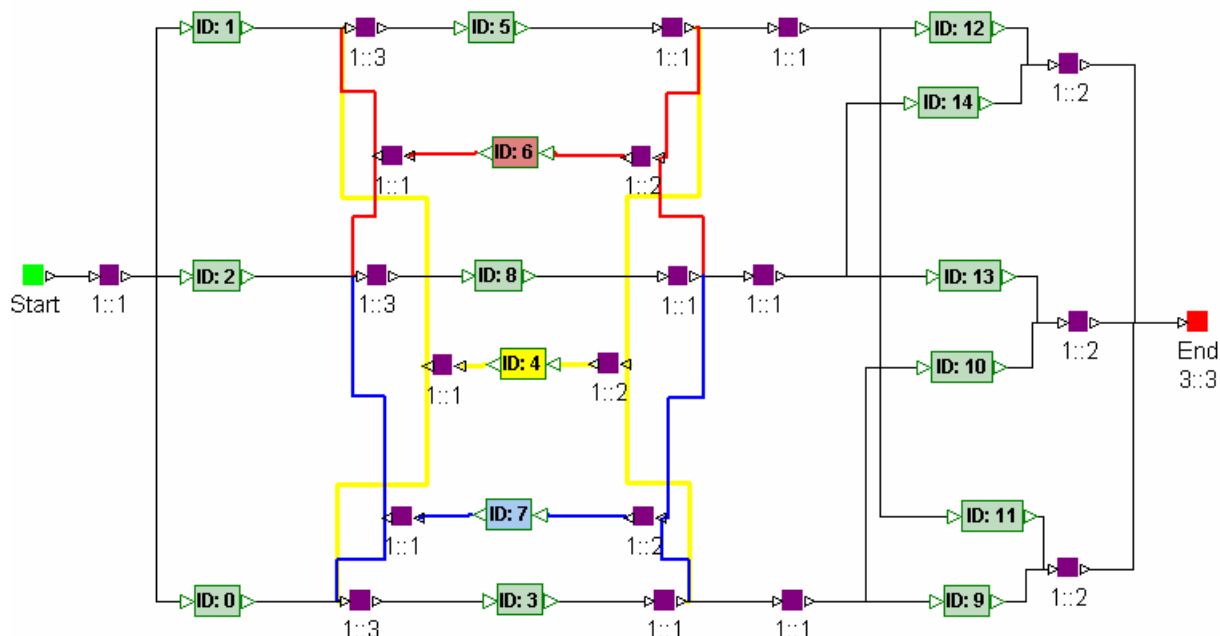


Рис.2.1.2 а). Блок-схема СЭС в редакторе Relex RBD

С использованием технологии Relex RBD были выполнены несколько видов расчетов надежности рассматриваемой СЭС.

Пример 1. Расчет надежности СЭС при заданных вероятностях безотказной работы элементов, независящих от времени.

Результаты расчета приведены в табл.2.1.1

Таблица 2.1.1.

Вероятность безотказной работы элементов	
элементов	системы
$P_i = 0.5 (i = 1 \div 15)$	0.070862
$P_i = 0.99 (i = 1 \div 15)$	0.998813
$P_i = 0.999 (i = 1 \div 15)$	0.99988

Пример 2. Расчет надежности невозстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения

Результаты расчета приведены в таблице 2.1.2

Таблица 2.1.2.

Средняя наработка до отказа элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 8760)	Средняя наработка до отказа системы (ч)	Интенсивность отказов системы в точке 8760
T_i = 17520ч (2 года) (i = 1 ÷ 15)	0.201540	5963.74	287.8818e-6
T_i = 1752000ч (200 лет) (i = 1 ÷ 15)	0.999703	596373.3	0.067442e-6

На рис.2.1.3 (рисунок получен копированием экрана результатов вычислений Relx RBD) приведены результаты расчетов невосстанавливаемой СЭС во времени.

Time	Reliability	Unreliability	Failure Rate
0	1.000000	0.000000	0.000000
876.00	0.973121	0.026879	59.433408
1752.00	0.904600	0.095400	105.501289
2628.00	0.810971	0.189029	142.732584
3504.00	0.705740	0.294260	173.693363
4380.00	0.599016	0.400984	199.955570
5256.00	0.497698	0.502302	222.547469
6132.00	0.405957	0.594043	242.180182
7008.00	0.325840	0.674160	259.369057
7884.00	0.257864	0.742136	274.502309
8760.00	0.201540	0.798460	287.881789

Рис.2.1.3. Результаты расчетов невосстанавливаемой СЭС на интервале (0 ÷ 8760ч)

Пример 3. Расчет восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения

Результаты расчета приведены в таблице 2.1.3

Таблица 2.1.3.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 8760ч)	Коэффициент готовности системы в точке 8760ч	Параметр потока отказов в точке 8760ч	Hazard Rate (величина обратная средней наработке между отказами)	Среднее время между отказами (MTBF)
T_i = 17520ч (2 года) (i = 1 ÷ 15)	T_{вi} = 100ч (i = 1 ÷ 15)	0.9351	0.999616	7.6578e-6	7.660775e-6	130585.26
T_i = 1752000ч (200 лет) (i = 1 ÷ 15)	T_{вi} = 100ч (i = 1 ÷ 15)	0.99999315	0.999999961	7.817e-10	7.817e-10	1.279e+9

Средняя наработка между отказами может быть получена как обратная величина к **Hazard Rate**; для $T_i = 17520$ ч. $T_{\text{между}} = 130535.09$ ч.

Среднее время восстановления системы может быть получено как

$$\text{MTBF} - 1/\text{Hazard Rate} = 50.17\text{ч.}$$

Для вероятности безотказной работы (это вероятность восстанавливаемой системы до первого отказа) вычисляется нижняя оценка.

Пример 4. Расчет смешанной СЭС с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами

- элементы $1 \div 9$ – восстанавливаемые;
- элементы $10 \div 15$ – невосстанавливаемые.

Результаты расчета приведены в таблице 2.1.4

Таблица 2.1.4.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Коэффициент готовности системы в точке 8760ч	Параметр потока отказов в точке 8760ч	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 8760ч)
$T_i = 17520$ч (2 года) ($I = 1 \div 15$)	$T_{vi} = 100$ч ($i = 1 \div 9$)	0.598753	$108.07e-6$	0.39
$T_i = 1752000$ч (200 лет) ($I = 1 \div 15$)	$T_{vi} = 100$ч ($i = 1 \div 9$)	0.9999237		

Для вероятности вычисляется приближенная оценка.

Пример 5. Автоматическое определение списка минимальных путей

Список минимальных путей (кратчайших путей успешного функционирования), полученный в ПК Relex RBD для заданного режима работы СЭС, приведен на рис.2.1.4

Path Sets									
1	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 1
2	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 12
3	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 1
4	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 15	ID: 1	ID: 12
5	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 2
6	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 15	ID: 2	ID: 12
7	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 2
8	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 15	ID: 2	ID: 12
9	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 2
10	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 2	ID: 12
11	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 2
12	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 2
13	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 1	ID: 2
14	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 14	ID: 15	ID: 2	ID: 12		
15	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 2
16	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 15	ID: 2	ID: 12
17	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 2
18	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 15	ID: 2	ID: 12
19	ID: 9	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 1		
20	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 2	ID: 12
21	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 12
22	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 12
23	ID: 9	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 1		
24	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 14	ID: 15	ID: 1	ID: 2	ID: 12
25	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 15	ID: 1	ID: 12
26	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 14	ID: 15	ID: 1	ID: 12
27	ID: 9	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 3		
28	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 15	ID: 2	ID: 3	ID: 12
29	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 15	ID: 3	ID: 12
30	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 15	ID: 3	ID: 12
31	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 2	ID: 3
32	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 15	ID: 2	ID: 3	ID: 12
33	ID: 9	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 3		
34	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 2	ID: 3	ID: 12
35	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 3	ID: 12
36	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 11	ID: 15	ID: 1	ID: 3	ID: 12
37	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 15	ID: 3
38	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 15	ID: 3	ID: 12
39	ID: 9	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 3		
40	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 2	ID: 3
41	ID: 9	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 1	ID: 3		
42	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 15	ID: 3
43	ID: 9	ID: 6	ID: 14	ID: 15	ID: 2	ID: 3	ID: 12		
44	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 15	ID: 3	ID: 12
45	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 15	ID: 1	ID: 3	ID: 12
46	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 14	ID: 15	ID: 3	ID: 12		
47	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 2	ID: 13
48	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 2	ID: 12	ID: 13
49	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 2	ID: 3	ID: 13
50	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 2	ID: 3	ID: 12	ID: 13
51	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 2	ID: 13		
52	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 2	ID: 12	ID: 13		
53	ID: 6	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 1	ID: 2	ID: 13		
54	ID: 6	ID: 4	ID: 11	ID: 1	ID: 2	ID: 12	ID: 13		
55	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 2	ID: 13
56	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 2	ID: 13
57	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 1	ID: 2	ID: 13
58	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 14	ID: 2	ID: 12	ID: 13		
59	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 2	ID: 13
60	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 2	ID: 12	ID: 13
61	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 1	ID: 2	ID: 13
62	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 14	ID: 1	ID: 2	ID: 12	ID: 13
63	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 2	ID: 3	ID: 13
64	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 2	ID: 3	ID: 13
65	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 1	ID: 2	ID: 3	ID: 13
66	ID: 9	ID: 6	ID: 14	ID: 2	ID: 3	ID: 12	ID: 13		
67	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 3	ID: 13
68	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 3	ID: 12	ID: 13
69	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 3	ID: 13
70	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 3	ID: 12	ID: 13
71	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 1	ID: 13		
72	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 1	ID: 12	ID: 13		
73	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 1	ID: 13
74	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 1	ID: 12	ID: 13
75	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 1	ID: 13
76	ID: 9	ID: 6	ID: 8	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 1	ID: 12	ID: 13
77	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 1	ID: 3	ID: 13
78	ID: 9	ID: 6	ID: 4	ID: 5	ID: 14	ID: 1	ID: 3	ID: 12	ID: 13
79	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 3	ID: 13
80	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 3	ID: 12	ID: 13
81	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 1	ID: 3	ID: 13
82	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 11	ID: 1	ID: 3	ID: 12	ID: 13
83	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 11	ID: 3	ID: 13
84	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 11	ID: 3	ID: 12	ID: 13
85	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 3	ID: 13
86	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 1	ID: 3	ID: 13
87	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 4	ID: 5	ID: 10	ID: 14	ID: 3	ID: 13
88	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 14	ID: 3	ID: 12	ID: 13		
89	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 11	ID: 1	ID: 13
90	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 11	ID: 1	ID: 12	ID: 13
91	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 10	ID: 14	ID: 1	ID: 13
92	ID: 9	ID: 6	ID: 7	ID: 8	ID: 4	ID: 14	ID: 1	ID: 12	ID: 13

Рис.2.1.4. Список минимальных путей СЭС

Всего определено 92 кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ) рассматриваемой СЭС.

Пример 6. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов СЭС

Список минимальных сечений приведен на рис.2.1.5. Рисунок получен копированием экрана таблицы минимальных сечений Relex RBD.

Cut Sets				
1	ID: 10	ID: 12		
2	ID: 11	ID: 14		
3	ID: 15	ID: 13		
4	ID: 9	ID: 11		
5	ID: 9	ID: 13		
6	ID: 6	ID: 10		
7	ID: 6	ID: 15		
8	ID: 4	ID: 12		
9	ID: 4	ID: 14		
10	ID: 9	ID: 6		
11	ID: 9	ID: 4		
12	ID: 6	ID: 4		
13	ID: 9	ID: 5	ID: 2	
14	ID: 9	ID: 5	ID: 1	
15	ID: 9	ID: 1	ID: 2	
16	ID: 6	ID: 8	ID: 1	
17	ID: 6	ID: 1	ID: 3	
18	ID: 6	ID: 8	ID: 3	
19	ID: 7	ID: 4	ID: 2	
20	ID: 7	ID: 4	ID: 3	
21	ID: 1	ID: 2	ID: 3	
22	ID: 4	ID: 2	ID: 3	
23	ID: 7	ID: 5	ID: 15	ID: 2
24	ID: 7	ID: 5	ID: 10	ID: 2
25	ID: 8	ID: 5	ID: 14	ID: 1
26	ID: 7	ID: 8	ID: 3	ID: 13
27	ID: 8	ID: 5	ID: 1	ID: 12
28	ID: 7	ID: 8	ID: 11	ID: 3
29	ID: 7	ID: 8	ID: 1	ID: 2
30	ID: 8	ID: 5	ID: 2	ID: 3
31	ID: 7	ID: 5	ID: 1	ID: 3

Рис.2.1.5. Список минимальных сечений отказов СЭС

Пример 7. Расчет значимостей и вкладов элементов СЭС

В RELEX значимости элементов (базисных событий) вычисляются только в модуле деревьев отказов (как указано в п.1.1.2.2). Вычисления проводятся по моделям Бирнбаума, критичности и Фусселя-Везели. Вклады элементов и сечений не вычисляются. Расчеты значимостей нами не проводились.

Пример 8. Немонотонная модель функционирования СЭС

Для вычисления показателей в соответствии с критерием (определяющим частичный отказ СЭС) $Y_C = \bar{y}_{22} \cdot \bar{y}_{23} \cdot y_{24}$ (рис. 2.1.6) построено дерево успехов, представленное на рис. 2.1.2 б) (рисунок получен копированием экрана результатов вычислений Relex Fault Tree).

Вероятность частичного отказа при $p_i = 0,5$ равна

$$P(Y_C = 1) = 0,0742798.$$

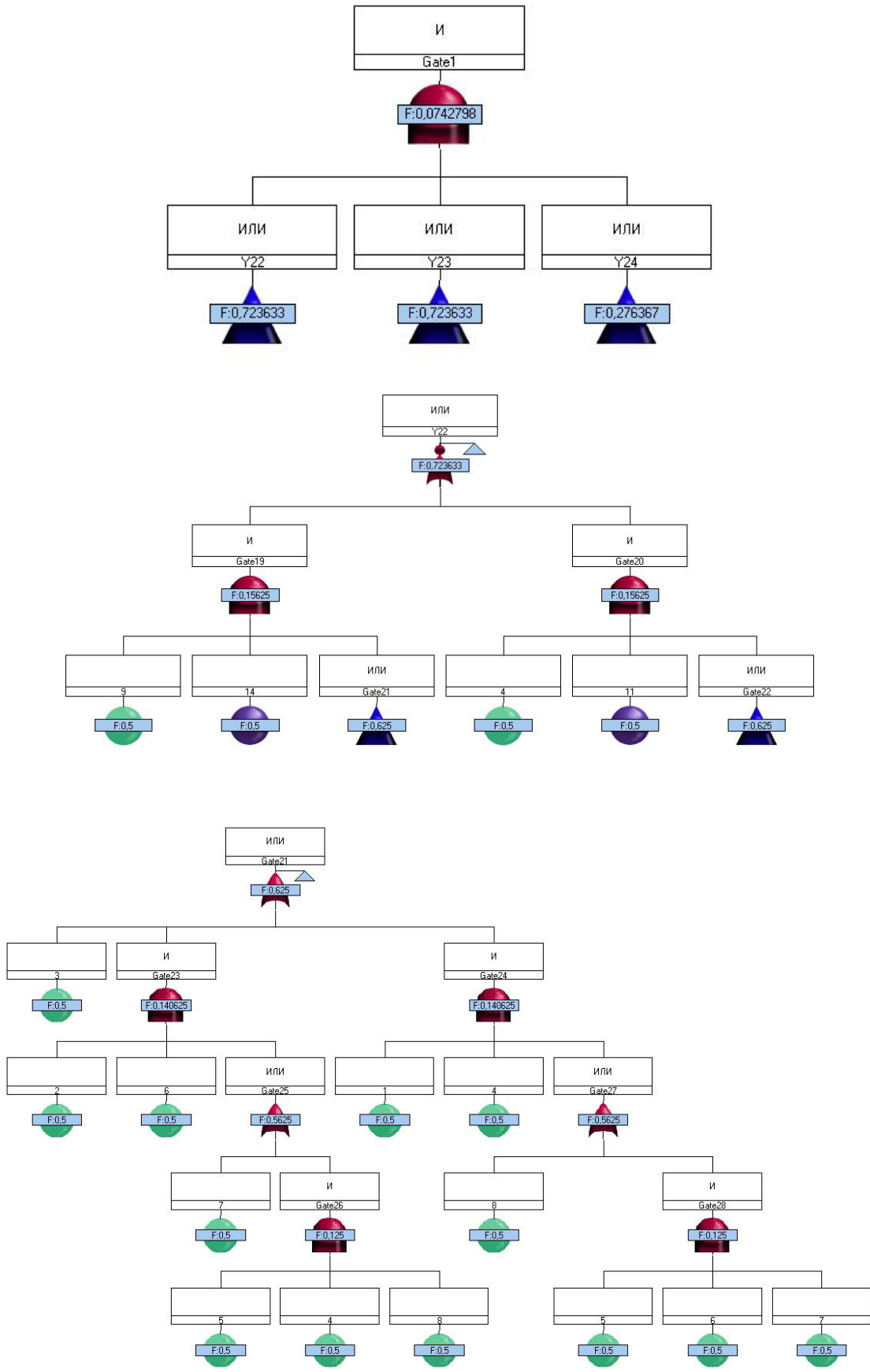


Рис.2.1.2 б) (начало)

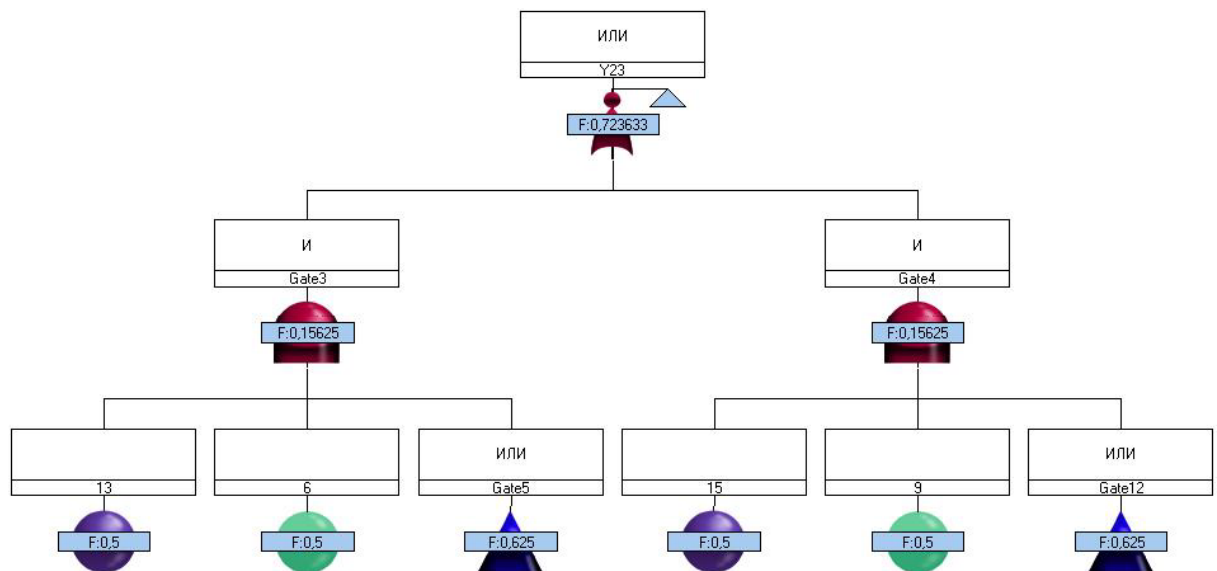
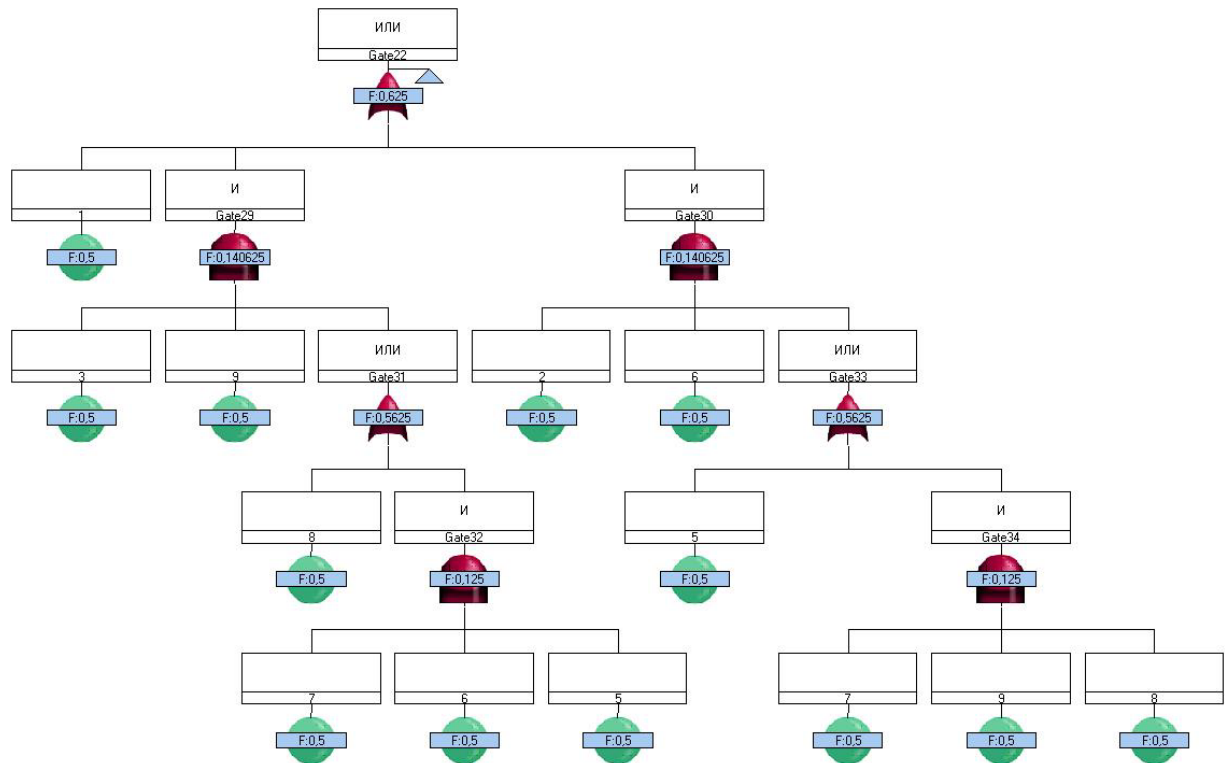


Рис.2.1.2 б) (продолжение)

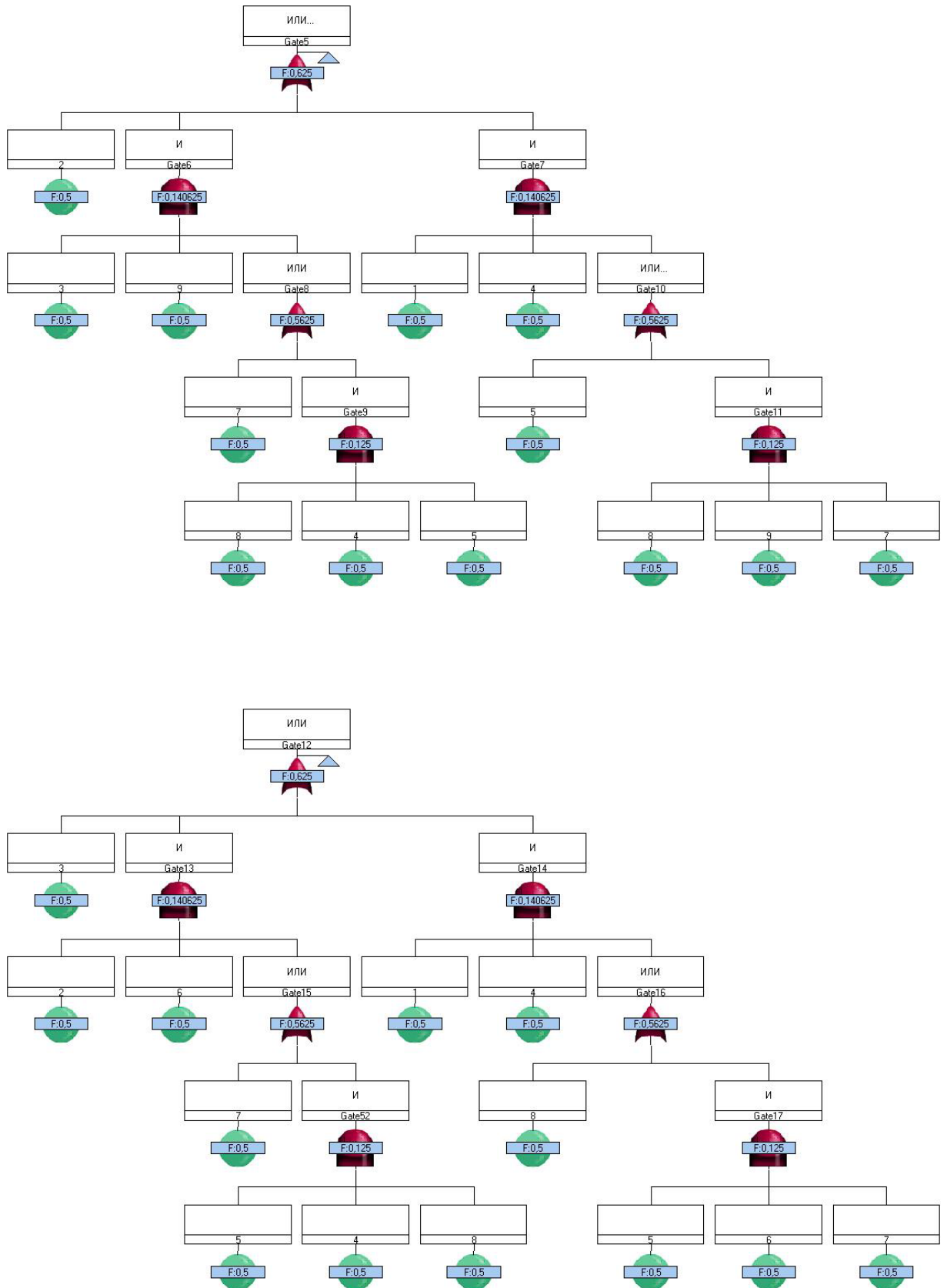


Рис.2.1.2 б) (продолжение)

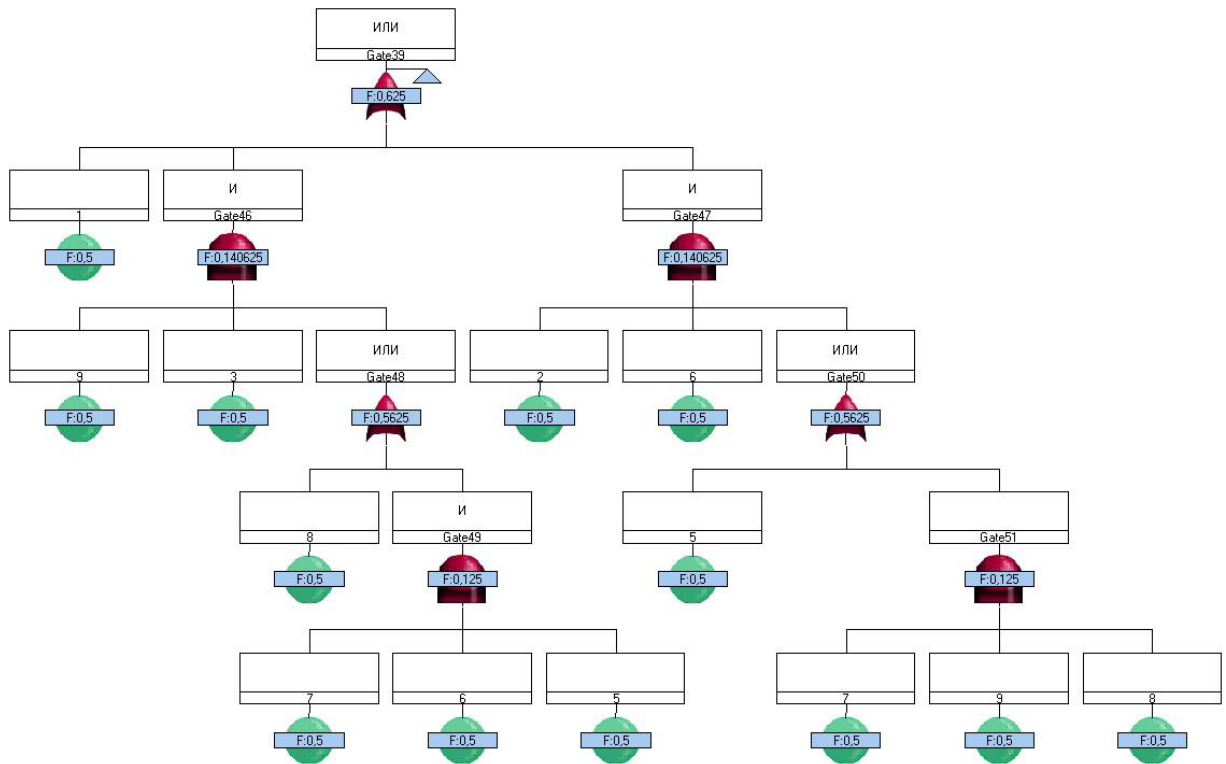
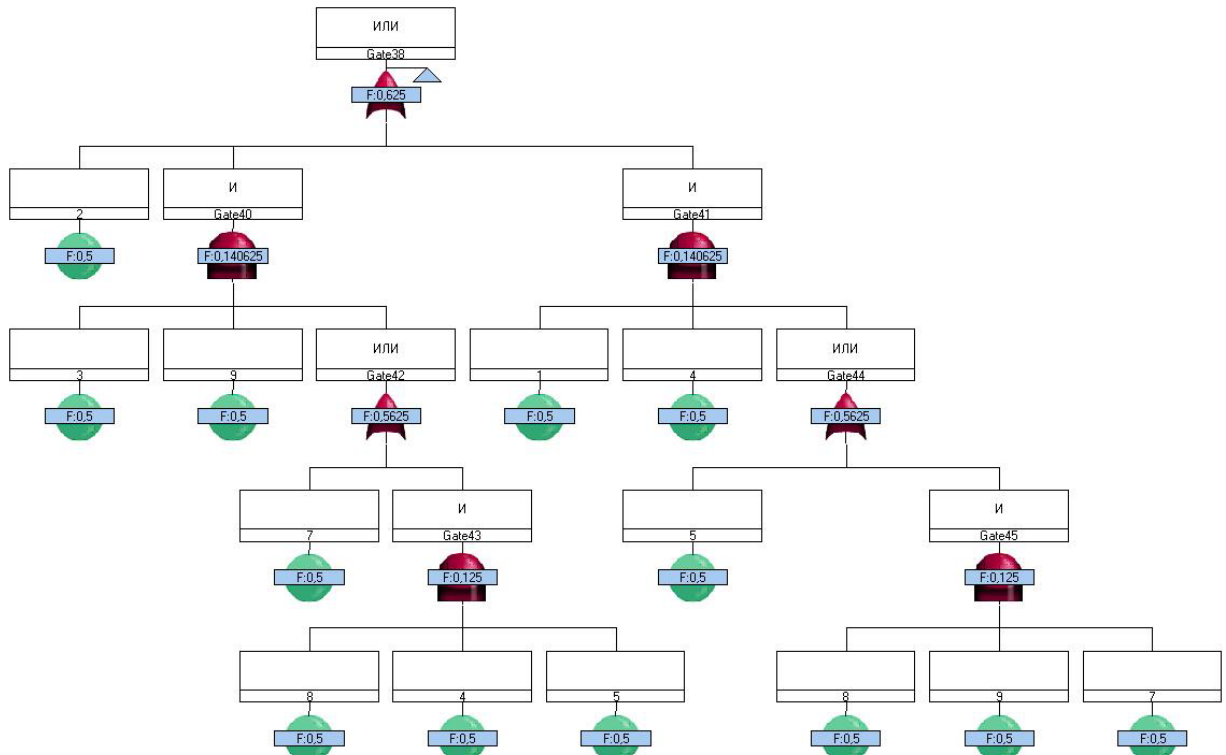


Рис.2.1.2 б) (окончание)

Fault Tree Report

Top Gate Name Gate1
Unavailability 0.07427979



File Name TestBridge.RPJ
Time 7:17
Date Апрель 27, 2005

Event List	Unavailability
-13, 6, 2, -9, -4, 12	0.015625000-
-6, -9, 4, 1, -11, 10	0.015625000-
-13, 6, 2, -9, -11, 12	0.015625000-
-13, -9, 4, 1, -11, 10	0.015625000-
-13, 6, 2, -3, -7, -4, 12	0.007812500-
-6, -3, -8 4, 1, -11, 10	0.007812500-
-13, 6, 2, -9, -5, -1, 12	0.007812500-
-13, 6, 2, -4, -15, -14, 12	0.007812500-
-2, -9, 4, -5, 1, -11, 10	0.007812500-
-6, 4, 1, -15, -14, -11, 10	0.007812500-
-13, 6, 2, -15, -14, -11, 12	0.007812500-
-13, 4, 1, -15, -14, -11, 10	0.007812500-
-13, 6, 2, -3, -7, -8, -11, 12	0.003906250-
-13, -3, -7, -8, 4, 1, -11, 10	0.003906250-
-13, 6, -8, 4, 5, 1, -11, 12	0.003906250-
-13, 6, 2, -9, 4, 5, -11, 10	0.003906250-
-13, 6, 2, -3, -7, -5, -1, 12	0.003906250-
-2, -3, -8 4, -5, 1, -11, 10	0.003906250-
-13, 6, 3, 9, 7, -4, -15, -14, 12	0.001953125-
-6, 3, 9, 8, 4, -15, -14, -11, 10	0.001953125-
-13, 6, 3, 9, 7, -15, -14, -11, 12	0.001953125-
-13, 6, 4, 5, 1, -15, -14, -11, 12	0.001953125-
-13, 3, 9, 8, 4, -15, -14, -11, 10	0.001953125-
-13, 6, 2, 4, 5, -15, -14, -11, 10	0.001953125-
-2, -7, 4, -5, 1, -15, -14, -11, 10	0.001953125-
-13, 6, 2, -8, -5, -1, -15, -14, 12	0.001953125-
-13, 6, -8, -7, -8, 4, 5, 1, -11, 12	0.000976562-
-13, 6, 2, -3, -7, -8, 4, 5, -11, 10	0.000976562-
-13, 6, 3, 9, 8, 4, 5, -15, -14, -11, 12	0.000488281-
-13, 6, 9, 7, 8, 4, 1, -15, -14, -11, 12	0.000488281-
-13, 6, 3, 9, 7, 4, 5, -15, -14, -11, 10	0.000488281-
-13, 6, 2, 9, 7, 8, 4, -15, -14, -11, 10	0.000488281-
-2, 3, 9, -7, 8, 4, -5, -15, -14, -11, 10	0.000488281-
-13, 6, 3, 9, 7, -8, -5, -1, -15, -14, 12	0.000488281-

Рис.2.1.2.в. Список немонотонных путей функционирования СЭС, полученный с помощью Relex Foutl Tree

2.1.3. Результаты решения на ПК АСМ СЗМА

На рис.2.1.6. изображена СФЦ рассматриваемой СЭС (рисунок считан с экрана ПК АСМ СЗМА).

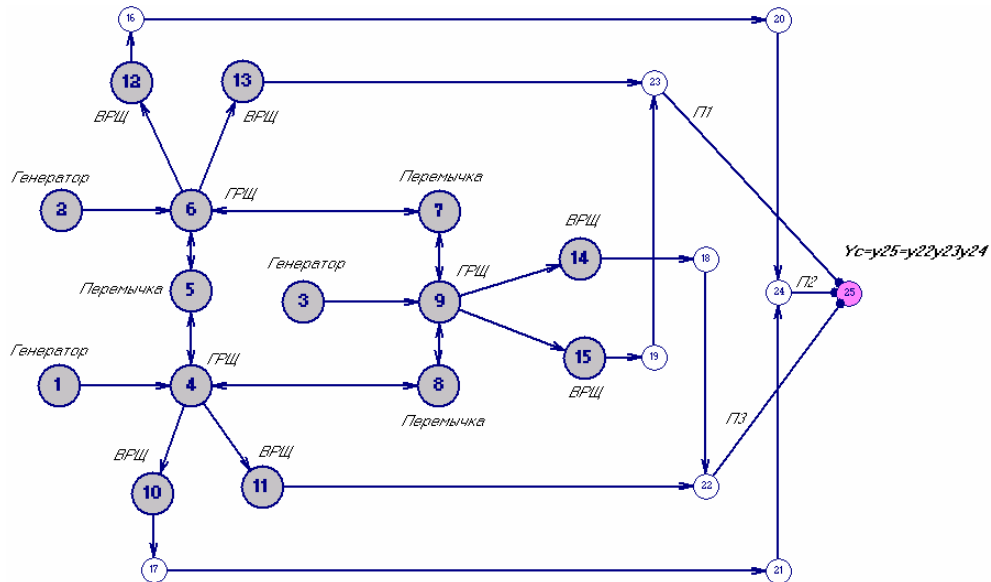


Рис. 2.1.6. СФЦ электроэнергетической системы

Не трудно видеть, что граф этой СФЦ подобен исходной функциональной схеме СЭС, приведенной на рис.2.1.1. Поэтому, ее построение не вызывает больших затруднений. Во всяком случае, нам представляется, что это значительно проще (и безошибочнее!), чем вручную строить дерево отказов этой системы (можно сравнить с деревом отказов на рис.2.1.9, которое необходимо пользователю построить, чтобы воспользоваться ПК Risk Spectrum. Еще труднее (практически невозможно) построить правильное дерево "успеха" для рассматриваемой СЭС.

В технологии и ПК АСМ описание структуры системы с помощью аппарата СФЦ фактически означает задание строгой системы логических уравнений (см. §1.2.1.1.5, выражения (1.2.8), (1.2.9)). В дальнейшем, на основе этой системы уравнений в ПК АСМ автоматически решаются все задачи логико-вероятностного моделирования и расчета показателей надежности рассматриваемой СЭС. Для этого необходимо только изменить логический критерий функционирования.

Пример 1. Расчет надежности СЭС при заданных вероятностях безотказной работы элементов, независящих от времени.

Решение этой задачи в технологии АСМ, было выполнено с помощью программных комплексов ПК АСМ 2001 и ПК АСМ СЗМА. Задавая параметры элементов $p_i = 0.5$ и логический критерий функционирования $Y_C = y_{25}$, получаем результаты расчетов, приведенные в табл.2.1.5.

Таблица 2.1.5.

Вероятность безотказной работы	
элементов	системы
$P_i = 0.5 (i = 1 \div 15)$	0.070861816406

Этот результат точно совпал с решением, полученным с помощью модуля Relex RBD (см. табл. 2.1.1).

Прямого решения указанной задачи с помощью ПК Risk Spectrum не приведено. Пересчет обратного решения данной задачи (моделирования и расчета вероятности отказа СЭС), полученного с помощью ПК Risk Spectrum на основе дерева отказов (см. табл. 2.1.13), дает результат: $1 - 0.995 = 0.005$. Он на порядок меньше правильного значения. Однако, по мнению специалистов СПбАЭП, такой пересчет делать нельзя, так как это "математически не верно" (?).

В ходе исследования, для выяснения причин расхождения результатов расчетов, в ПК АСМ 2001 была реализована методика вычислений вероятностных показателей, которая используется в ПК Risk Spectrum. После задания противоположного ЛКФ $\bar{Y}_c = \bar{y}_{25}$ для СФЦ изображенной на рис.2.1.6 и выполнения с помощью ПК АСМ 2001 моделирования и расчета вероятности отказа СЭС, были получены следующие результаты:

правильный расчет - **0.929138183594**;
 расчет по методике Risk Spectrum - **0.995338161990199**.

Последний результат практически совпадает с решением этой задачи на ПК Risk Spectrum, приведенным в табл.2.1.13 (для $P_i = 0.5$).

Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения

Решение данного примера выполнено с помощью ПК АСМ 2001 и ПК АСМ СЗМА, на основе той же СФЦ СЭС (см. рис.2.1.6) и критерия работоспособности $Y_c = y_{25}$. Результаты моделирования и расчетов представлены в таблице 2.1.6.

Таблица 2.1.6.

Средняя наработка до отказа элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 8760)	Средняя наработка до отказа системы (ч)
Toi = 17520ч (2 года) (i = 1 ÷ 15)	0.201540416714	5963.808

Результаты расчетов вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа СЭС, полученные программными средствами технологии АСМ, практически совпали с результатами расчетов этих показателей, полученными с помощью модуля Relex RBD (см. §2.1.2, табл.2.1.2 расчетов примера 2).

Результаты расчетов невосстанавливаемой СЭС во времени приведены в табл.2.1.7.

Значения вероятностей безотказной работы СЭС получены путем прямого моделирования на ПК АСМ по критерию работоспособности y_{25} , а вероятности отказа – путем инверсного моделирования по критерию не работоспособности \bar{y}_{25} . Результаты точного моделирования и расчетов на ПК АСМ полностью совпали с результатами аналогичных расчетов, выполненных с помощью модуля Relex RBD (см. §2.1.2, рис.2.1.3).

В последних столбцах табл.2.1.7 приведены, для сравнения, приближенные результаты расчетов вероятности отказа СЭС, выполненные в ПК АСМ 2001 по методике, используемой в ПК Risk Spectrum и процентная оценка погрешности вычислений итоговых вероятностей.

Таблица 2.1.7.

Наработка t	Точное моделирование и расчеты с помощью ПК АСМ		Расчеты ПК АСМ по методике Risk Spectrum	
	Вероятность безотказной работы СЭС (y_{25})	Вероятность отказа за СЭС (y_{25})	Вероятность отказа СЭС	Погрешность расчетов (%)
876	0.973121005773	0.026878994227	0.028175287305966	4.8
1752	0.904599951813	0.095400048187	0.111412395555148	16.9
2628	0.810971304824	0.189028695176	0.229999071068994	21.7
3504	0.705740183429	0.294259816571	0.374241552644846	27.2
4380	0.599016308437	0.400983691563	0.515413483671557	28.5
5256	0.497698142440	0.502301857560	0.64909628009154	29.2
6132	0.405957263659	0.594042736341	0.756409808059014	27.3
7008	0.325840001772	0.674159998228	0.842191529203191	24.9
7884	0.257864105248	0.742135894752	0.901335730546703	21.5
8760	0.201540416714	0.798459583286	0.942488015231833	18.0

Исследования показали, что погрешности расчетов вероятностей в Risk Spectrum существенно сокращаются при малых значениях вероятностей исходных событий ($p_i < 0.001$), что указано в технической документации на этот программный комплекс.

На рис.2.1.7 изображен график точной вероятностной функции безотказной работы СЭС (рисунок получен копированием экрана результатов точных вычислений ПК АСМ СЗМА).

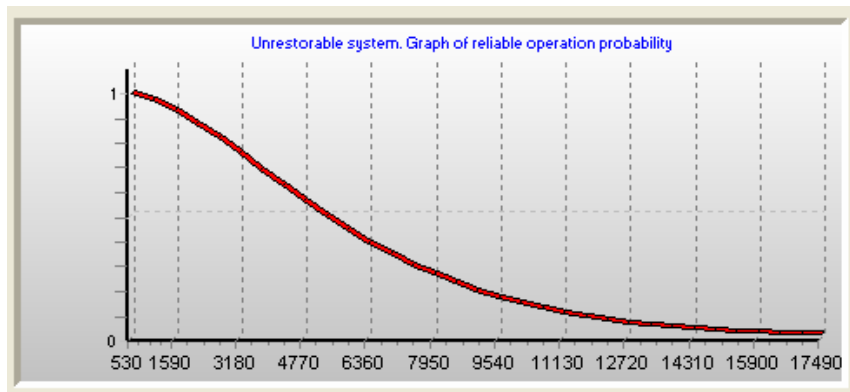


Рис. 2.1.7. График вероятности безотказной работы невосстанавливаемой СЭС

Расчет показателя интенсивности отказа системы в заданной временной точке (см. табл.2.1.2. и рис.2.1.3 столбец 4) в ПК АСМ, в настоящее время, не реализован.

Расчет показателя интенсивности отказа системы в заданной временной точке с помощью ПК Risk Spectrum не приведено.

Пример 3. Расчет восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения

Решение данного примера выполнено с помощью ПК АСМ 2001 и ПК АСМ СЗМА, на основе той же СФЦ СЭС и критерия работоспособности $Y_C = y_{25}$. Результаты моделирования и расчетов показателей надежности восстанавливаемой СЭС приведены в табл.2.1.8.

Таблица 2.1.8.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 8760ч)	Коэффициент готовности системы в точке 8760 ч	Среднее время восстановления системы	Средняя наработка на отказ
Ti = 17520ч (2 года) (i = 1 ÷ 15)	Tvi = 100ч (i = 1 ÷ 15)	0.93511795	0.999615889512	50.1592	130535.10768

Полученные показатели вероятности безотказной работы и коэффициента готовности СЭС практически совпали с результатами расчетов модулем Relex RBD (см. §2.1.2, табл.2.1.3 результатов расчетов примера 3).

Показатель, названный в технологии АСМ "Средняя наработка на отказ" – 130535.10768 час, оказался несколько меньше показателя "Среднее время между отказами" (MTBF) вычисленного Relex RBD – 130585.26 час. Но он практически совпал с показателем "Средняя наработка между отказами", вычисляемого на основе данных Relex RBD – $1/(Hazard\ Rate) = 130535.7$ час. Приблизительно оценку показателя MTBF в технологии АСМ можно получить, складывая значение средней наработки на отказ и значение среднего времени восстановления, что в данном примере составляет $130535.10768 + 50.1592 = 130585.26688$ час.

Среднее время восстановления **50,1592** час, вычисленное ПК АСМ, несколько больше, чем оценка, полученная на основе данных Relex RBD - **49,6** час.

Непосредственный расчет показателей "Параметр потока отказов" и "Hazard Rate" в ПК АСМ в настоящее время не выполняется.

По предложению специалистов СПбАЭП, для сравнения точности расчетов показателей надежности СЭС при малых значениях вероятностей отказа элементов, с показателями, вычисленными с помощью ПК Risk Spectrum, на ПК АСМ были выполнены расчеты при более высоких показателях надежности элементов системы ($T_{oi} = 200$ лет, $T_{vi} = 100$ час). Полученные результаты представлены в табл.2.1.9

Таблица 2.1.9.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность отказа системы на интервале (0 ÷ 8760ч), 1/год	Коэффициент неготовности системы в точке 8760 ч	Среднее время восстановления системы, час	Частота отказов, 1/год	Средняя наработка на отказ, лет
T_{oi}=200л.= 1752000 ч (i = 1 ÷ 15)	T_{vi} = 100ч (i = 1 ÷ 15)	7.0E-6	3.9087E-8	50.0015	7.0E-6	146030.2

Пример 4. Расчет смешанной СЭС с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами

Решение данного примера выполнено с помощью ПК АСМ 2001 и ПК АСМ СЗМА, на основе той же СФЦ СЭС (см. рис.2.1.6) и критерия работоспособности $Y_c = y_{25}$. Дополнительными являются следующие условия:

- элементы 1 ÷ 9 – восстанавливаемые;
- элементы 10 ÷ 15 – невосстанавливаемые.

Результаты моделирования и расчетов показателей надежности смешанной СЭС приведены в таблице 2.1.10

Таблица 2.1.10.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность готовности смешанной системы на интервале и в точке 8760 час.
$T_i = 17520\text{ч}$ (2 года) ($I = 1 \div 15$)	$T_{vi} = 100\text{ч}$ ($i = 1 \div 9$)	0.598752831444
$T_i = 1752000\text{ч}$ (200 лет) ($I = 1 \div 15$)	$T_{vi} = 100\text{ч}$ ($i = 1 \div 9$)	0.999923671047= =1 - 0.000076328953

В технологии ПК АСМ в настоящее время реализованы вычисления показателя надежности смешанной системы, которых назван "Вероятность готовности смешанной системы" и соответствующих значимостей и вкладов элементов. Полученное в ПК АСМ значение вероятности готовности смешанной СЭС практически полностью совпало со значением показателя, который в технологии Relex назван "Коэффициент готовности системы в точке 8760 ч.", и вычисляемого с помощью модуля Relex RBD (см. §2.1.2, табл.2.1.4 результатов расчетов примера 4).

Расчеты показателей "Параметр потока отказов" и "Вероятность безотказной работы" смешанной системы в ПК АСМ в настоящее время не выполняются.

С помощью ПК Risk Spectrum выполнено решение (см. табл.2.1.17) второго варианта указанных расчетов (нижняя строка табл.2.1.10). При указанных параметрах надежности элементов имеет место хорошая сходимость результатов вычислений.

Пример 5. Автоматическое определение списка минимальных путей

Определение списка минимальных путей или кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ), в технологии и ПК АСМ является частным случаем решения общей задачи логического моделирования. Логическая ФРС, представляющая список минимальных путей рассматриваемой СЭС, автоматически определяется в ПК АСМ на основе СФЦ работоспособности и прямого ЛКФ $Y_C = y_{25}$, в минимальной дизъюнктивной нормальной форме представления содержит 92 конъюнкции:

$Y_C = y_{25} =$	x1 x2 x4 x6 x11 x12 x13 x1 x2 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x1 x2 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x7 x1 x2 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x8 x1 x4 x6 x11 x12 x13 x5 x1 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x5 x1 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x7 x5 x1 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x8 x5 x1 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x13 x7 x1 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x7 x1 x4 x6 x9 x11 x12 x13 x7 x8 x1 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x7 x8 x1 x2 x4 x6 x10 x11 x13 x1 x4 x6 x10 x11 x13 x5 x1 x3 x4 x6 x9 x10 x11 x13 x7 x1 x4 x6 x9 x10 x11 x13 x7 x8 x1 x3 x4 x9 x10 x11 x15 x1 x2 x4 x6 x9 x10 x11 x15 x7 x1 x4 x6 x9 x10 x11 x15 x7 x5 x1 x4 x9 x10 x11 x15 x8 x2 x4 x6 x11 x12 x13 x5 x2 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x5 x2 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x7 x5 x2 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x8 x5 x2 x4 x6 x10 x11 x13 x5 x2 x3 x4 x6 x9 x10 x11 x15 x5 x2 x4 x6 x9 x10 x11 x15 x7 x5 x2 x4 x6 x9 x10 x11 x15 x8 x5 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x13 x7 x5 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x7 x5 x3 x4 x6 x9 x10 x11 x13 x7 x5 x3 x4 x6 x9 x10 x11 x15 x7 x5 x2 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x13 x8 x2 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x8 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x13 x8 x5 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x8 x5 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x13 x7 x8 x3 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x7 x8 x2 x3 x4 x6 x9 x10 x11 x13 x8 x3 x4 x6 x9 x10 x11 x13 x8 x5 x3 x4 x6 x9 x10 x11 x13 x7 x8 x3 x4 x9 x10 x11 x15 x8 x2 x4 x6 x9 x11 x12 x13 x7 x8 x2 x4 x6 x9 x11 x12 x15 x7 x8 x2 x4 x6 x9 x10 x11 x13 x7 x8 x2 x4 x6 x9 x10 x11 x15 x7 x8	∨	x2 x3 x6 x9 x12 x13 x14 x2 x3 x6 x9 x12 x14 x15 x1 x3 x4 x6 x9 x12 x13 x14 x5 x1 x3 x4 x6 x9 x12 x14 x15 x5 x3 x4 x6 x9 x12 x13 x14 x8 x5 x3 x4 x6 x9 x12 x14 x15 x8 x5 x3 x6 x9 x12 x13 x14 x7 x3 x6 x9 x12 x14 x15 x7 x1 x2 x3 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x1 x3 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x5 x1 x3 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x7 x1 x3 x4 x9 x10 x14 x15 x2 x3 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x5 x2 x3 x4 x6 x9 x10 x14 x15 x5 x3 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x7 x5 x3 x4 x6 x9 x10 x14 x15 x7 x5 x2 x3 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x8 x3 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x8 x5 x3 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x7 x8 x3 x4 x9 x10 x14 x15 x8 x2 x6 x9 x12 x13 x14 x7 x2 x6 x9 x12 x14 x15 x7 x1 x2 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x7 x1 x2 x4 x6 x9 x10 x14 x15 x7 x2 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x7 x5 x2 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x7 x8 x2 x4 x6 x9 x10 x14 x15 x7 x8 x1 x4 x6 x9 x12 x13 x14 x7 x5 x1 x4 x6 x9 x12 x14 x15 x7 x5 x1 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x7 x5 x1 x4 x6 x9 x10 x14 x15 x7 x5 x1 x2 x4 x6 x9 x12 x13 x14 x8 x1 x2 x4 x6 x9 x12 x14 x15 x8 x1 x4 x6 x9 x12 x13 x14 x8 x5 x1 x4 x6 x9 x12 x14 x15 x8 x5 x1 x4 x6 x9 x12 x13 x14 x7 x8 x1 x4 x6 x9 x12 x14 x15 x7 x8 x1 x2 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x8 x1 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x8 x5 x1 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x7 x8 x1 x4 x9 x10 x14 x15 x8 x2 x4 x6 x9 x12 x13 x14 x8 x5 x2 x4 x6 x9 x12 x14 x15 x8 x5 x2 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x8 x5 x2 x4 x6 x9 x10 x13 x14 x8 x5
------------------	--	---	---

Приведенная ФРС считана из файла результатов программного комплекса ПК АСМ СЗМА. Каждая конъюнкция данной ФРС представляет отдельный кратчайший (минимальный) путь успешного функционирования рассматриваемой СЭС.

Полученный результат точно совпал со списком минимальных путей СЭС, полученным с помощью модуля Relex RBD (см. §2.1.2, рис.2.1.4).

ПК Risk Spectrum не обеспечивает решения задач данного типа.

Пример 6. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов СЭС

Список минимальных сечений отказов (МСО) формируется в ПК АСМ автоматически тем же методом решения системы логических уравнений, который используется при построении КПУФ исследуемых систем. Для получения МСО достаточно только указать (задать) противоположный ЛКФ неработоспособности (отказа) исследуемой СЭС $\bar{Y}_c = \bar{y}_{25}$. В результате получаем список из 31-го МСО рассматриваемой СЭС.

$$\bar{Y}_c = \bar{y}_{25} = y_{25} \quad \vee$$

x"1 x"3 x"7 x"5	x"6 x"10
x"3 x"4 x"7	x"10 x"12
x"3 x"11 x"7 x"8	x"1 x"2 x"3
x"1 x"9 x"5	x"1 x"3 x"6
x"4 x"9	x"2 x"3 x"4
x"9 x"11	x"2 x"3 x"8 x"5
x"1 x"14 x"8 x"5	x"3 x"6 x"8
x"4 x"14	x"3 x"13 x"7 x"8
x"11 x"14	x"1 x"2 x"9
x"1 x"2 x"7 x"8	x"2 x"9 x"5
x"1 x"6 x"8	x"6 x"9
x"1 x"12 x"8 x"5	x"9 x"13
x"2 x"4 x"7	x"2 x"15 x"7 x"5
x"4 x"6	x"6 x"15
x"4 x"12	x"13 x"15
x"2 x"10 x"7 x"5	

Данная ФРС считана из файла результатов программного комплекса ПК АСМ СЗМА. В записи этой функции двумя штрихами помечены инверсированные логические переменные. Каждая конъюнкция данной ФРС представляет отдельное минимальное сечение отказа рассматриваемой СЭС.

Полученный результат точно совпал со списками минимальных сечений отказов рассматриваемой СЭС, полученными с помощью модуля Relex RBD (см. §2.1.2, рис.2.1.5) и с помощью ПК Risk Spectrum (см. §2.1.4, табл.2.1.19 примера 4).

Заметим, что автоматическое построение МСО в технологии и ПК АСМ не требует разработки новой СФЦ (например, в виде дерева отказов). СФЦ остается прежней (см. рис.2.1.1), для получения решения достаточно только изменить логический критерий функционирования и ПК АСМ автоматически построит требуемую логическую функцию.

Пример 7. Расчет значимостей и вкладов элементов СЭС

Расчет показателей роли элементов СЭС выполнен на основе положений ОЛВМ, изложенных в §1.2.1.4.2.5, которые реализованы в технологии и ПК АСМ.

В следующей таблице 2.1.11 приведены значения значимостей, положительных и отрицательных вкладов каждого элемента СЭС, полученные с помощью ПК АСМ 2001 и ПК АСМ СЗМА при решении примера 1 (см. §2.1.2, табл.2.1.1. и §2.1.3, табл.2.1.5).

Таблица 2.1.11.

Таблица показателей роли элементов в обеспечении работоспособности СЭС

Номер элемента i	Вероятность безотказной работы элемента p_i	Значимость элемента ξ_i	Отрицательный вклад элемента β_i^-	Положительный вклад элемента β_i^+
1	0.5	0.03991699	-0.01995850	0.01995850
2	0.5	0.03991699	-0.01995850	0.01995850
3	0.5	0.03991699	-0.01995850	0.01995850
4	0.5	0.09484863	-0.04742432	0.04742432
5	0.5	0.02380371	-0.01190186	0.01190186
6	0.5	0.09484863	-0.04742432	0.04742432
7	0.5	0.02380371	-0.01190186	0.01190186
8	0.5	0.02380371	-0.01190186	0.01190186
9	0.5	0.09484863	-0.04742432	0.04742432
10	0.5	0.05603027	-0.02801514	0.02801514
11	0.5	0.05603027	-0.02801514	0.02801514
12	0.5	0.05603027	-0.02801514	0.02801514
13	0.5	0.05603027	-0.02801514	0.02801514
14	0.5	0.05603027	-0.02801514	0.02801514
15	0.5	0.05603027	-0.02801514	0.02801514

Данные показатели получены на основе модели работоспособности СЭС (СФЦ на рис.2.1.6, ЛКФ $Y_C = y_{25}$, $p_i = 0.5$, $i = 1, 2, \dots, 15$). На рис. 2.1.8 изображена диаграмма положительных вкладов элементов СЭС (рисунок получен копированием экрана результатов точных вычислений ПК АСМ СЗМА).



Рис. 2.1.8. Диаграмма положительных вкладов

ПК АСМ позволяют вычислять показатели роли элементов на основе любых моделей исследуемых систем (работоспособности, отказа и их немонотонных вариантов). Например, показатели роли элементов вычисленные на основе модели неработоспособности (отказа) СЭС (см. §2.1.3, пример 6, СФЦ на рис.2.1.6, ЛКФ $\bar{Y}_C = \bar{y}_{25}$, $p_i = 0.5$, $i = 1, 2, \dots, 15$) имеют те же абсолютные величины, что и в приведенной табл.2.1.11, но с противоположными знаками.

Полученные результаты не совпали ни с одной оценкой роли элементов данной СЭС, полученными с помощью ПК Risk Spectrum (см. §3.2.2, табл.2.1.21, столбец $q=0.5$).

Пример 8. Немонотонная модель функционирования СЭС

Требуется построить модели и рассчитать вероятностные частичного отказа СЭС, который определяется следующими условиями:

- Структура СЭС задана СФЦ, изображенной на рис.2.1.6, а ее полная работоспособность (безотказность) определяется критерием $Y_C = y_{25} = y_{22} \cdot y_{23} \cdot y_{24}$ ($p_i = 0.5, i = 1, 2, \dots, 15$);
- Рассматриваемый в данном примере частичный отказа СЭС определяется событием (см. рис.2.1.1 и рис.2.1.6) обеспечения питанием потребителя П2 (y_{24}) и одновременного не обеспечения питанием потребителей П1 (\bar{y}_{23}) и П3 (\bar{y}_{22}).

Подобные задачи часто имеют место при качественно-сложном анализе систем так называемого второго типа, когда различные отказовые и работоспособные их состояния существенно различаются по степени возможных аварийных последствий, затрат, ожидаемого ущерба или по уровню эффективности выполнения системой своего функционального назначения.

Решение примера с помощью ПК АСМ осуществляется путем задания логического критерия указанного частичного отказа $Y_{\text{отказа}} = y_{24} \cdot \bar{y}_{23} \cdot \bar{y}_{22}$. В результате автоматизированного моделирования и расчетов на ПК АСМ СЗМА были получены следующие результаты.

1. Логическая ФРС (логическая функция реализации частичного отказа), автоматически сформированная в ПК АСМ, включает следующие 34 конъюнкции:

$$Y_{\text{отказа}} = \left| \begin{array}{l} x''1 \ x2 \ x''3 \ x6 \ x12 \ x''13 \ x''7 \ x''5 \\ x2 \ x''3 \ x''4 \ x6 \ x12 \ x''13 \ x''7 \\ x1 \ x''2 \ x''3 \ x4 \ x10 \ x''11 \ x''8 \ x''5 \\ x1 \ x''3 \ x4 \ x''6 \ x10 \ x''11 \ x''8 \\ x2 \ x''3 \ x4 \ x6 \ x10 \ x''11 \ x''13 \ x''7 \ x''8 \ x5 \\ x1 \ x''3 \ x4 \ x10 \ x''11 \ x''13 \ x''7 \ x''8 \\ x1 \ x''3 \ x4 \ x6 \ x''11 \ x12 \ x''13 \ x''7 \ x''8 \ x5 \\ x2 \ x''3 \ x6 \ x''11 \ x12 \ x''13 \ x''7 \ x''8 \\ x1 \ x''2 \ x4 \ x''9 \ x10 \ x''11 \ x''5 \\ x1 \ x4 \ x''6 \ x''9 \ x10 \ x''11 \\ x''1 \ x2 \ x6 \ x''9 \ x12 \ x''13 \ x''5 \\ x2 \ x''4 \ x6 \ x''9 \ x12 \ x''13 \\ x2 \ x4 \ x6 \ x''9 \ x10 \ x''11 \ x''13 \ x5 \\ x1 \ x4 \ x''9 \ x10 \ x''11 \ x''13 \\ x1 \ x4 \ x6 \ x''9 \ x''11 \ x12 \ x''13 \ x5 \\ x2 \ x6 \ x''9 \ x''11 \ x12 \ x''13 \\ x''2 \ x3 \ x4 \ x9 \ x10 \ x''11 \ x''14 \ x''15 \ x''7 \ x8 \ x''5 \\ x1 \ x''2 \ x4 \ x10 \ x''11 \ x''14 \ x''15 \ x''7 \ x''5 \\ x3 \ x4 \ x''6 \ x9 \ x10 \ x''11 \ x''14 \ x''15 \ x8 \\ x1 \ x4 \ x''6 \ x10 \ x''11 \ x''14 \ x''15 \\ x''1 \ x3 \ x6 \ x9 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x7 \ x''8 \ x''5 \\ x''1 \ x2 \ x6 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x''8 \ x''5 \\ x3 \ x''4 \ x6 \ x9 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x7 \\ x2 \ x''4 \ x6 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \\ x2 \ x4 \ x6 \ x9 \ x10 \ x''11 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x7 \ x8 \\ x3 \ x4 \ x9 \ x10 \ x''11 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x8 \\ x3 \ x4 \ x6 \ x9 \ x10 \ x''11 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x7 \ x5 \\ x2 \ x4 \ x6 \ x10 \ x''11 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x5 \\ x1 \ x4 \ x10 \ x''11 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \\ x1 \ x4 \ x6 \ x9 \ x''11 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x7 \ x8 \\ x3 \ x6 \ x9 \ x''11 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x7 \\ x3 \ x4 \ x6 \ x9 \ x''11 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x8 \ x5 \\ x1 \ x4 \ x6 \ x''11 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \ x5 \\ x2 \ x6 \ x''11 \ x12 \ x''13 \ x''14 \ x''15 \end{array} \right|$$

В данном случае каждая конъюнкция ФРС не является ни КПУФ, ни МСО в их классическом определении. Это немонотонная логическая ФРС рассматриваемой системы. Прямые логические переменные в конъюнкциях представляют различные минимальные комбинации состояний работоспособности элементов СЭС, обеспечивающих питанием потребителя П1. Остальные, инверсированные логические переменные в конъюнкциях этой ФРС (помечены двойным штрихом и выделены), представляют различные минимальные комбинации состояний отказа элементов СЭС, вследствие которых не обеспечиваются питанием одновременно потребители П2 и П3.

2. Точный многочлен вероятностной функции, автоматически сформированный в ПК АСМ, включает следующие 57 одночленов:

$$P_{\text{отказа}} = q1 p2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 q12 q13 q7 q8 p5 + p1 q2 q3 p4 p6 p9 q10 q11 p12 q13 q7 q8 p5 + q1 p2 p4 p6 p9 p11 p12 q13 q14 q15 q8 q5 + p1 q2 p4 p6 p9 q10 q11 p12 q13 q14 q15 p5 + p1 q2 p4 p6 p9 p10 q11 p13 q14 q15 q7 q5 + q1 p2 p4 p6 p9 p10 q11 q12 q13 q14 q15 p5 + q2 p3 p4 p6 p9 q11 p12 q13 q14 q15 p7 + q1 p3 p4 p6 p9 p10 q11 q13 q14 q15 p8 + q1 p2 q3 p4 p6 p9 p12 q13 q7 q5 + p1 q2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 q8 q5 + p1 q3 p4 p6 p9 p10 q11 q13 q7 q8 + p2 q3 p4 p6 p9 q11 p12 q13 q7 q8 + p1 p4 p6 p9 p10 q11 q13 q14 q15 + p2 p4 p6 p9 q11 p12 q13 q14 q15 + p2 q3 q4 p6 p9 p12 q13 q7 + p1 q3 p4 q6 p9 p10 q11 q8 + p2 q4 p6 p9 p12 q13 q14 q15 + p1 p4 q6 p9 p10 q11 q14 q15 + p1 p4 p6 q9 p10 q11 q13 + p2 p4 p6 q9 q11 p12 q13 + p1 q2 p4 p6 q9 p10 q11 p13 q5 + p1 p4 q6 q9 p10 q11 + q1 p2 p4 p6 q9 p11 p12 q13 q5 + p2 q4 p6 q9 p12 q13 + q1 p2 p4 p6 q9 p10 q11 q12 q13 p5 + p1 q2 p4 p6 q9 q10 q11 p12 q13 p5 + q1 q2 p3 p4 p6 p9 p10 q11 p13 q14 q15 q7 p8 q5 + q1 p3 p4 q6 p9 p10 q11 q14 q15 p8 + q1 q2 p3 p4 p6 p9 p11 p12 q13 q14 q15 p7 q8 q5 q2 p3 q4 p6 p9 p12 q13 q14 q15 p7 + q1 p2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 q12 q13 q14 q15 p7 p8 q5 + q1 q2 p3 p4 p6 p9 q10 q11 p12 q13 q14 q15 q7 p8 p5 + p1 q2 q3 p4 p6 p9 q10 q11 p12 q13 q14 q15 p7 p8 q5 + q1 q2 p3 p4 p6 p9 q10 q11 p12 q13 q14 q15 q7 q8 p5 - p1 p2 p4 p6 q9 p10 q11 p12 q13 - p1 q3 p4 q6 p9 p10 q11 q14 q15 q8 - p2 q3 q4 p6 p9 p12 q13 q14 q15 q7 - p1 p2 p4 p6 p9 p10 q11 p12 q13 q14 q15 - p2 q3 p4 p6 p9 q11 p12 q13 q14 q15 q7 q8 - p1 p2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 p12 q13 q7 q8 - p1 q3 p4 p6 p9 p10 q11 q13 q14 q15 q7 q8 + p1 p2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 p12 q13 q14 q15 q7 q8 - p1 q2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 q13 q7 q8 q5 - p1 q2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 q13 q14 q15 q7 q8 q5 - q1 p2 q3 p4 p6 p9 q11 p12 q13 q14 q15 q7 q8 q5 - q1 p2 q3 p4 p6 p9 q11 p12 q13 q14 q15 q7 q8 q5 - q1 p2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 p12 q13 q14 q15 p8 - q1 q2 p3 p4 p6 p9 p10 q11 p12 q13 q14 q15 p7 p8 - p1 q2 p3 p4 p6 p9 p10 q11 p12 q13 q14 q15 p7 - q1 p2 p3 p4 p6 p9 p10 q11 q12 q13 q14 q15 p8 p5 - p1 q2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 p13 q14 q15 q7 q8 q5 - p1 q2 p3 p4 p6 p9 q10 q11 p12 q13 q14 q15 p7 p5 - q1 p2 q3 p4 p6 p9 p11 p12 q13 q14 q15 q7 q8 q5 - p1 q2 q3 p4 p6 p9 q10 q11 p12 q13 q14 q15 q7 q8 p5 - q1 p2 q3 p4 p6 p9 p10 q11 q12 q13 q14 q15 q7 q8 p5$$

3. Вероятность заданного вида отказа СЭС, вычисленная в ПК АСМ с помощью полученного многочлена ВФ, при условии $p_i = q_i = 0.5, i = 1, 2, \dots, 15$, составляет

$$P_{\text{отказа}} = \mathbf{0.074279785156}.$$

Проверить непротиворечивость этого результата можно прямо на ПК АСМ. Для этого достаточно ввести в ПК АСМ точную инверсию предыдущего логического критерия

$$\overline{Y}_{\text{Отказа}} = \overline{y_{24} \cdot y_{23} \cdot y_{22}} = \overline{y_{24}} \vee \overline{y_{23}} \vee \overline{y_{22}}$$

В результате автоматизированного моделирования на ПК АСМ получаем вероятность

$$p(\overline{Y}_{\text{Отказа}}) = \mathbf{0.925720214844} = \mathbf{1 - 0.074279785156},$$

т.е. полную согласованность прямой и обратной математической модели исследуемой системы, что и требовалось показать. Подобные проверки постоянно производятся для всех задач решаемых методами и программными средствами технологии автоматизированного структурно-логического моделирования систем.

4. Полученные в ПК АСМ характеристики значимостей и вкладов элементов в показатель $P_{\text{отказа}}$ (частичного отказа) СЭС, приведены в таблице 2.1.12:

Таблица 2.1.12.

Таблица показателей роли элементов в обеспечении $P_{\text{отказа СЭС}}$

Номер элемента i	Вероятность безотказной работы элемента p_i	Значимость элемента ξ_i	Отрицательный вклад элемента β_i^-	Положительный вклад элемента β_i^+
1	0.5	0.03991699	-0.02874756	0.02874756
2	0.5	0.03991699	-0.02874756	0.02874756
3	0.5	0.03991699	0.00592041	-0.00592041
4	0.5	0.09484863	-0.02740479	0.02740479
5	0.5	0.02380371	-0.02740479	0.02740479
6	0.5	0.09484863	0.02728271	-0.02728271
7	0.5	0.02380371	-0.03436279	0.03436279
8	0.5	0.02380371	0.04547119	-0.04547119
9	0.5	0.09484863	-0.03436279	0.03436279
10	0.5	0.05603027	0.04547119	-0.04547119
11	0.5	0.05603027	0.01226807	-0.01226807
12	0.5	0.05603027	0.01226807	-0.01226807
13	0.5	0.05603027	0.00372314	-0.00372314
14	0.5	0.05603027	0.00372314	-0.00372314
15	0.5	0.05603027	0.00323486	-0.00323486

5. На рисунке 2.1.9 изображена диаграмма положительных вкладов элементов СЭС (рисунок получен копированием экрана результатов точных вычислений ПК АСМ СЗМА):

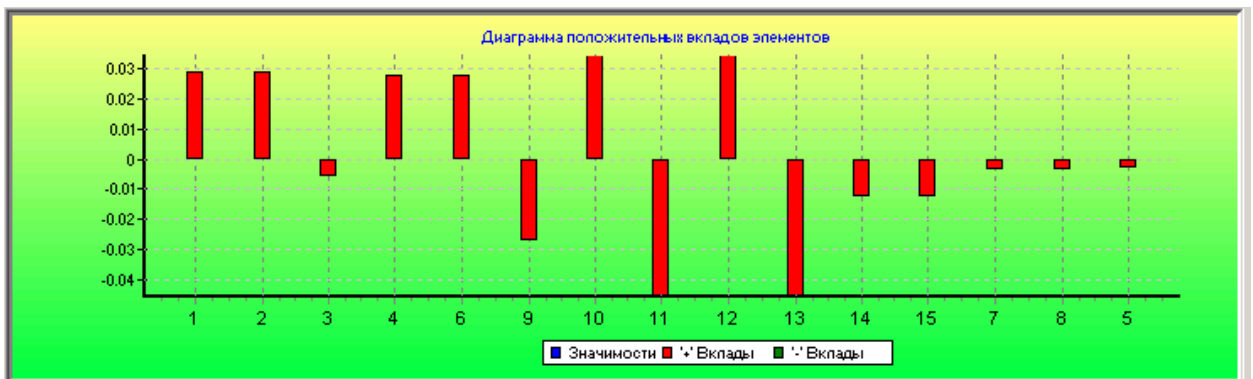


Рис. 2.1.9. Диаграмма положительных вкладов

Данные, приведенные в таблице и диаграмме, показывают, что увеличение параметра безотказности p_i элементов $i = 1, 2, 4, 6, 10$ и 12 приведет к повышению, а элементов $i = 3, 5, 7, 8, 9, 11, 13, 14$ и 15 приведет к уменьшению вероятности $P_{\text{отказа}}$ данного вида частичного отказа СЭС.

Автоматизированное моделирование и расчет показателей надежности немонотонных режимов функционирования СЭС на основе СФЦ работоспособности (аналог блок-схемы) выполнено только с помощью ОЛВМ, технологии и ПК АСМ.

2.1.4. Результаты решения задач анализа СЭС на ПК «RISK SPECTRUM»

Дерево отказов для СЭС представлено на рисунке 2.1.10. Решалась только обратная задача. Возможность решения прямых задач с помощью данного кода будет показана на менее громоздких примерах.

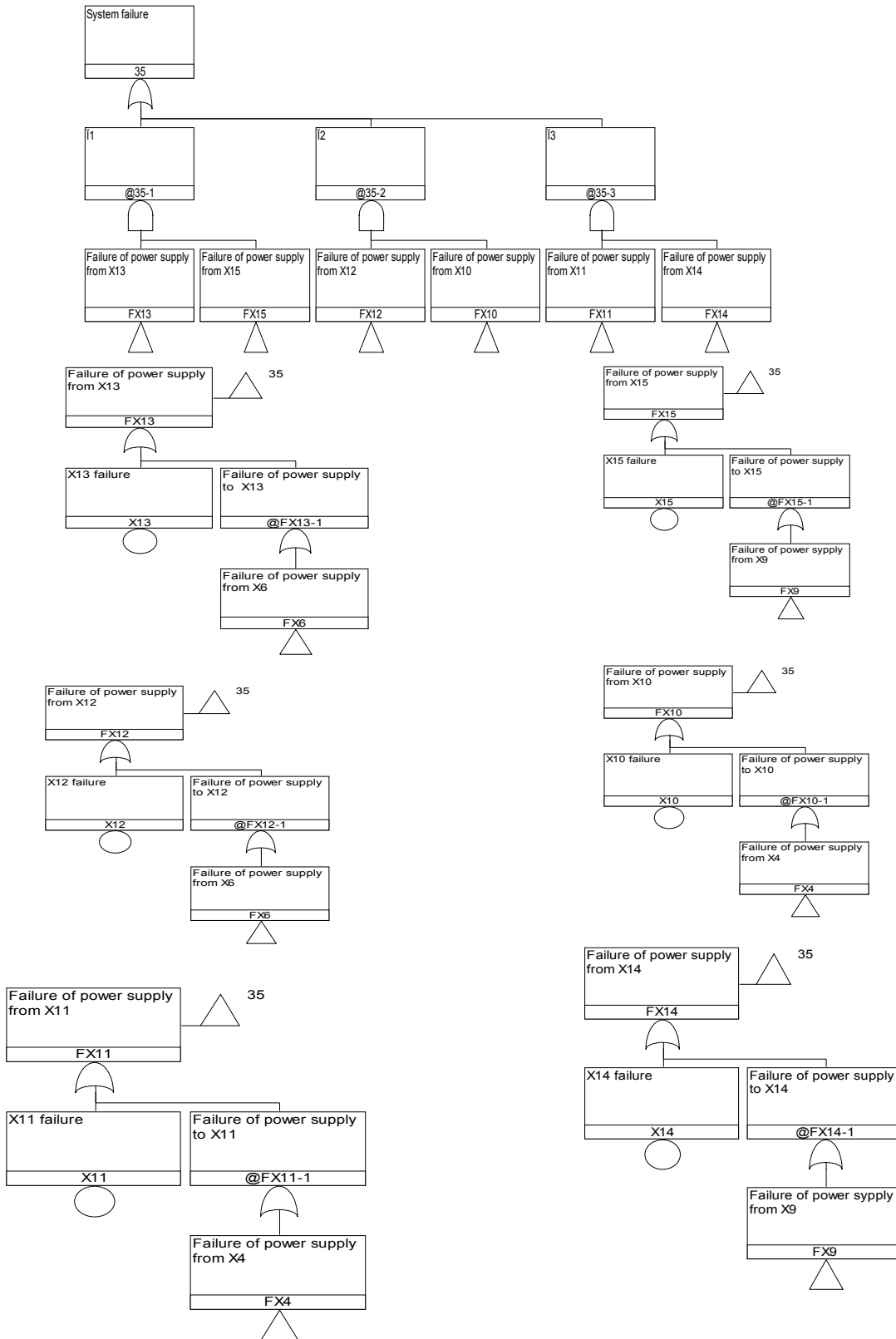


Рис.2.1.10. Дерево отказов для задачи «35» (начало).

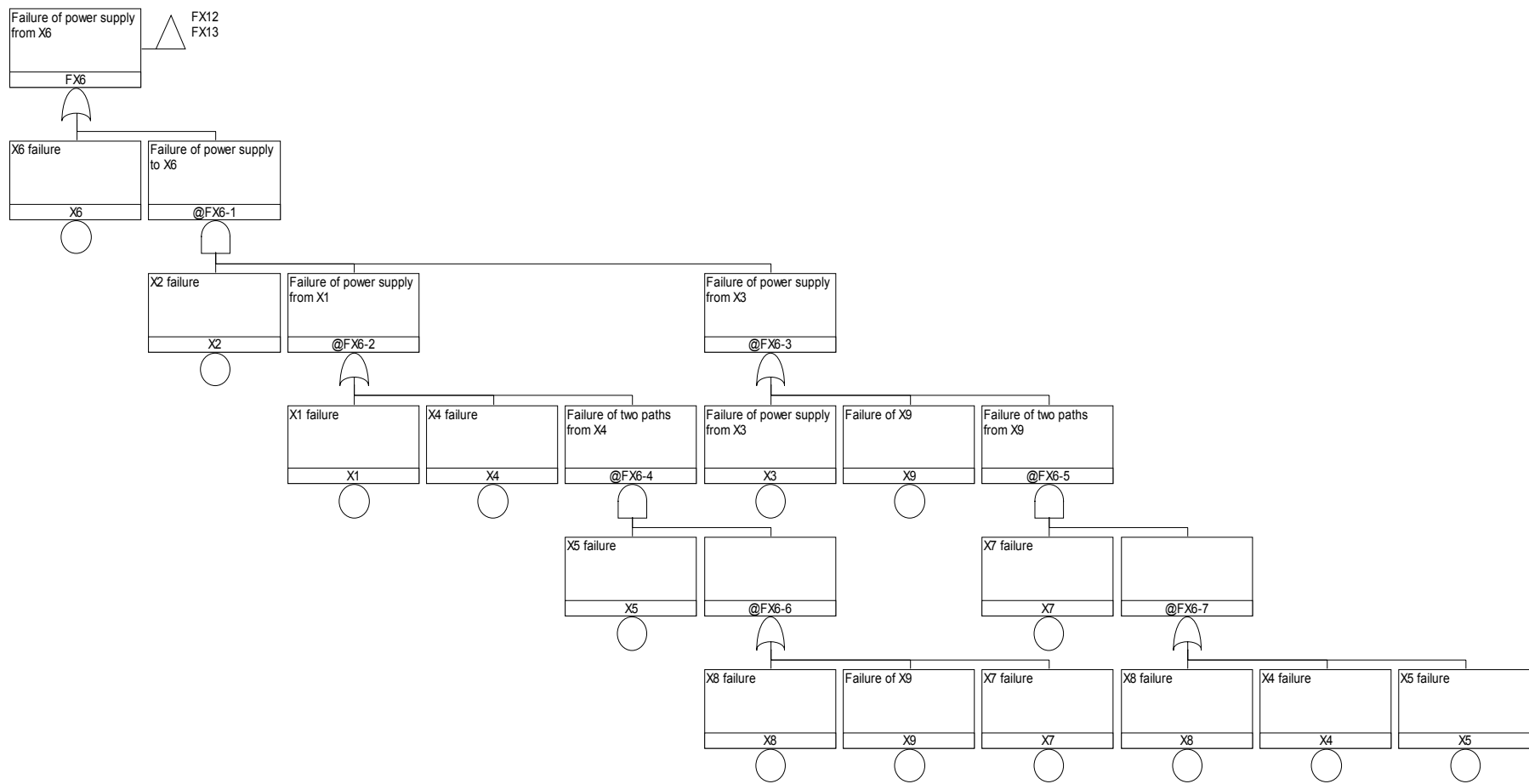


Рис.2.1.10. Дерево отказов для задачи «35» (продолжение).

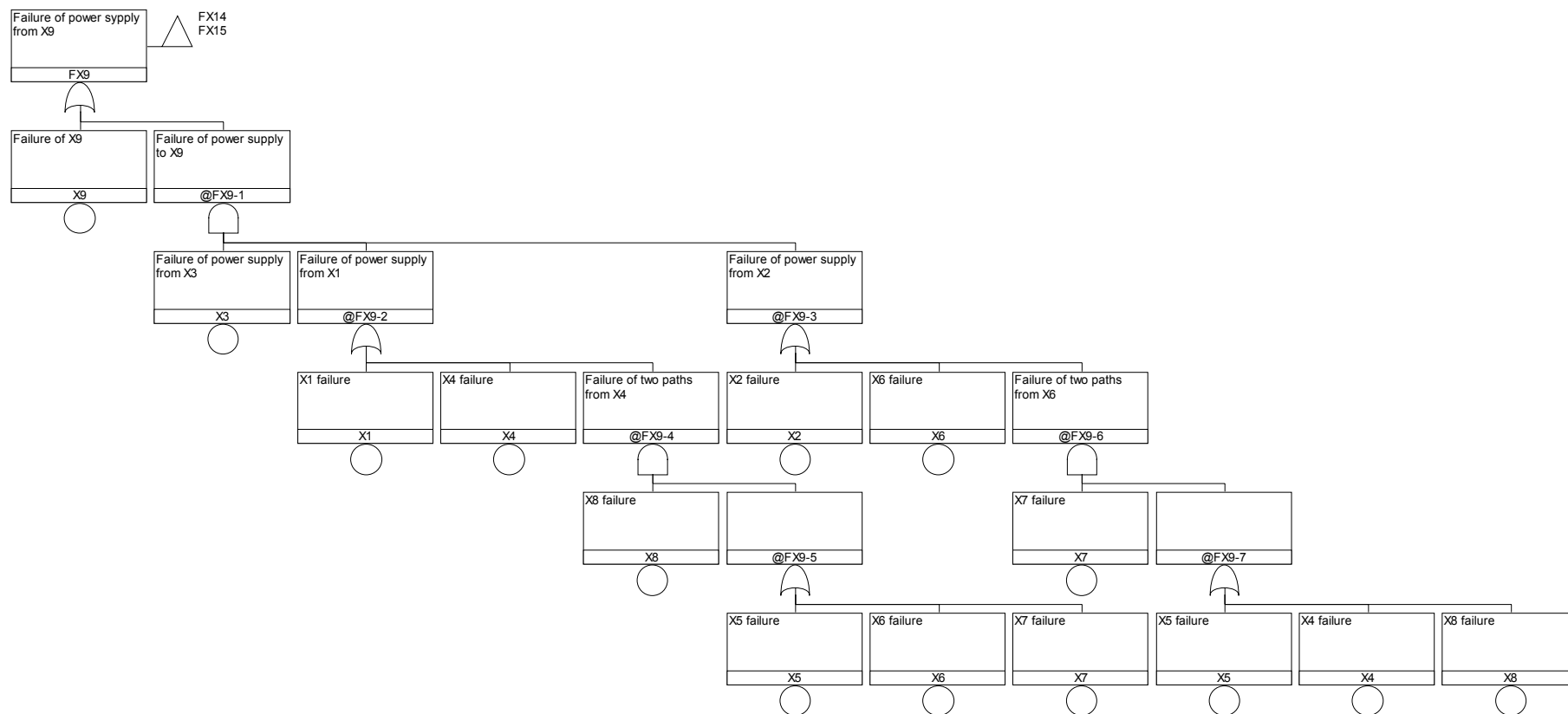


Рис.2.1.10. Дерево отказов для задачи «35» (продолжение).

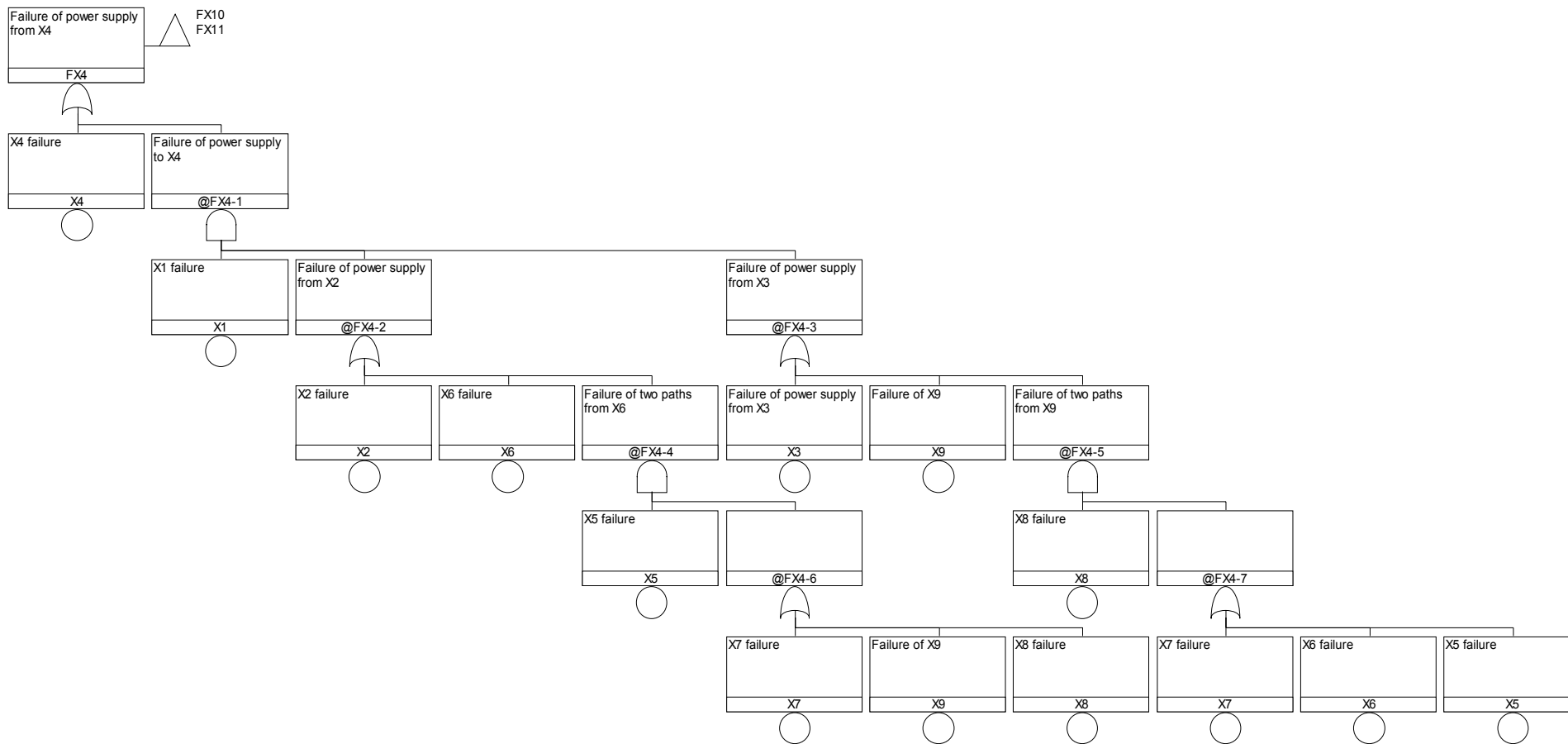


Рис.2.1.10. Дерево отказов для задачи «35» (окончание).

Пример 1. Расчет надежности СЭС при заданных вероятностях безотказной работы элементов, независящих от времени

Решение этой задачи было выполнено при задании трех значений параметров элементов: $q_i = 0.5$, $q_i = 0.01$, $q_i = 0.001$. Результаты расчетов приведены в таблице 2.1.13.

Таблица 2.1.13.

элементов	Вероятность отказа		
	системы		
	Risk Spectrum	ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ2001, NEWАСМ,NEWАСМ-3	Расхождение, относительное
$q_i = 0.5 (i = 1 \div 15)$	0.995	0.929	0.071
$q_i = 0.01 (i = 1 \div 15)$	0.00121	0.001186705	0.0196
$q_i = 0.001 (i = 1 \div 15)$	0.00001201	0.00001199	0.00167

Для случаев, когда задавались значения параметров надежности элементов, равные $q_i = 0.01$, $q_i = 0.001$, в целях проверки точности получаемых результатов выполнялись параллельные расчеты с помощью различных версий ПК АСМ (ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ 2001, ПК NEWАСМ, ПК NEWАСМ-3 и др.), в основе которых лежит единый математический и алгоритмический аппарат общего логико-вероятностного метода, теории и технологии автоматизированного структурно-логического моделирования систем.

Примечание: Результаты решения всех примеров, рассматриваемых в данной НИР, для всех четырех кодов, основанных на технологии АСМ (ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ 2001, NEWАСМ, NEWАСМ-3), совпадают (при условии, что указанные программные комплексы могут решать задачи данного класса).

Как следует из таблицы 2.1.11, при $q_i = 0.5$ полученная вероятность отказа системы значительно выше значения, полученного с помощью двух других кодов. При задании $q_i = 0,01$ вероятность отказа СЭС уже близка к значению, полученному с помощью ПК АСМ. При задании $q_i = 0,001$ вероятность отказа СЭС практически совпадает со значениями, полученными с помощью ПК АСМ.

Примечание:

Как уже указывалось, см. п. 1.3, код «Risk Spectrum» позволяет получать лишь **приблизительные** (верхнюю и нижнюю) оценки рассчитываемых вероятностных показателей надежности и безопасности. В частности, при использовании представления логико-вероятностной модели в виде множества минимальных сечений отказов обеспечивается получение **верхнего** предела для точного значения вероятности отказа. Другими словами, рассчитанная вероятность отказа системы заведомо **выше** фактической.

Кроме того, при таком подходе сумма вероятности отказа и вероятности безотказной работы не равна единице. Поэтому принципиально недопустимо сравнение величин вероятностей безотказной работы, рассчитанной, например, с помощью ПК АСМ 2001 при решении прямой задачи, и вероятности отказа рассчитанной путем вычитания из единицы вероятности отказа, рассчитанной с помощью Risk Spectrum при решении обратной задачи.

Для получения более корректной оценки вероятности безотказной работы необходимо решать с помощью Risk Spectrum обратную задачу, т.е. строить «дерево успеха», инверсировать параметры надежности элементов и производить расчеты. При этом полученное значение ВБР будет несколько ниже фактического.

Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.

Решение данного примера выполнено на основе того же дерева отказов СЭС (см. рис.2.1.9). Результаты моделирования и расчетов представлены в таблице 2.1.14:

Таблица 2.1.14.

Средняя наработка до отказа элементов	Вероятность отказа системы на интервале (0 ÷ 8760)	
$T_{0i} = 17\,520$ ч (2 года) ($i = 1 \div 15$)	Risk Spectrum	ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ2001, NEWАСМ, NEWАСМ-3
	0.943	0.79846
$T_{0i}=1752000$ ч (200 лет) ($i = 1 \div 15$)	0.0002999 (0.0002997)	0.000296873

Результаты расчетов вероятности отказа СЭС при высоких заданных вероятностях отказа элементов ($T_{0i} = 17\,520$ ч), не совпали с результатами расчетов этих показателей, полученными с помощью кодов Relex и АСМ.

При задании более высоких параметров надежности элементов ($T_{0i} = 1\,752\,000$ ч) вновь имеем достаточно хорошее совпадение с данными, полученными с помощью кодов ПК Relex и АСМ.

Результаты расчетов надежности невосстанавливаемой СЭС во времени приведены в таблицах 2.1.15, 2.1.16 (см. также рис. 2.1.3, табл. 2.1.7 и табл. 2.1.9).

**Результаты расчетов надежности невосстанавливаемой ЭЭС во времени
(первый уровень аппроксимации)**

Таблица 2.1.15.

Наработка, t (час)	Вероятность отказа системы, вычисленная при $T_{0i} = 17\,520$ ч (2 г.)			Вероятность отказа системы, вычисленная при $T_{0i} = 1\,752\,000$ ч (200 лет)		
	Risk Spectrum	ПК АСМ	Относительная погрешность	Risk Spectrum	ПК АСМ	Относительная погрешность
1	2	3	4	5	6	7
876	0.02935	0.026878994	0.084190997	0.000003002	0.000002996875	0.001707195
1752	0.1119	0.095400048	0.147452652	0.00001201	0.000011974997	0.002914488
2628	0.2334	0.189028695	0.190108418	0.00002701	0.000026915608	0.003494706
3504	0.3755	0.294259817	0.21635202	0.00004802	0.000047799947	0.004582528
4380	0.5195	0.400983692	0.228135339	0.00007502	0.000074609247	0.005475247
5256	0.6506	0.502301858	0.227940582	0.000108	0.000107324739	0.006252417
6132	0.7594	0.594042736	0.217747253	0.000147	0.000145927648	0.007294912
7008	0.8432	0.674159998	0.200474385	0.000192	0.000190399197	0.008337516
7884	0.903	0.742135895	0.178144081	0.000243	0.000240720607	0.009380218
8760	0.943	0.798459583	0.153277218	0.0002999	0.000296873096	0.010093044

**Результаты расчетов надежности невосстанавливаемой ЭЭС во времени
(третий уровень аппроксимации) Таблица 2.1.16.**

Наработка, t (час)	Вероятность отказа системы, вычисленная при $T_{oi} = 17\,520$ ч (2 г.)			Вероятность отказа системы, вычисленная при $T_{oi} = 1\,752\,000$ ч (200 лет)		
	Risk Spectrum	ПК АСМ	Относительная погрешность	Risk Spectrum	ПК АСМ	Относительная погрешность
1	2	3	4	5	6	7
876	0.02935	0.026878994	0.084190997	0.000003002	0.000002996875	0.001707195
1752	0.1009	0.095400048	0.054508938	0.00001201	0.000011974997	0.002914488
2628	0.2201	0.189028695	0.141169036	0.00002701	0.000026915608	0.003494706
3504	0.372	0.294259817	0.208978988	0.00004801	0.000047799947	0.004375193
4380	0.5193	0.400983692	0.227838067	0.000075	0.000074609247	0.00521004
5256	0.6504	0.502301858	0.227703171	0.000108	0.000107324739	0.006252417
6132	0.7594	0.594042736	0.217747253	0.0001469	0.000145927648	0.006619142
7008	0.8432	0.674159998	0.200474385	0.0001919	0.000190399197	0.007820756
7884	0.903	0.742135895	0.178144081	0.0002428	0.000240720607	0.008564222
8760	0.943	0.798459583	0.153277218	0.0002997	0.000296873096	0.009432446

Как следует из результатов, приведенных в таблицах 2.1.15, 2.1.16 (столбец №4), при задании больших вероятностей отказа элементов системы с увеличением наработки системы и, соответственно, увеличением вероятности отказа элементов ЭЭС, погрешность расчетов с помощью кода Risk Spectrum вначале увеличивается, а затем начинает снижаться.

При задании более высоких параметров надежности элементов вновь имеем хорошее совпадение с данными, полученными с помощью ПК АСМ (величина погрешности значительно снижается, см. столбец №7). При этом характер изменения величины погрешности имеет более простой вид – с увеличением времени работы элементов величина погрешности возрастает.

Примечание:

В дальнейшем, если это не будет оговорено особо, все задачи для данного примера на ПК Risk Spectrum будут решаться при более высоких значениях параметров надежности элементов систем, чем те, которые использовались при расчетах с помощью кодов Relex и ПК АСМ. Целью этих расчетов является подтверждение возможности или невозможности выполнения тех или иных вычислений с помощью кода Risk Spectrum.

Пример 3. Расчет восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения

Решение данного примера выполнено на основе того же дерева отказов СЭС (см. рис.2.1.10). Окно ПК Risk Spectrum с результатами решения представлено на рис. 2.1.11.

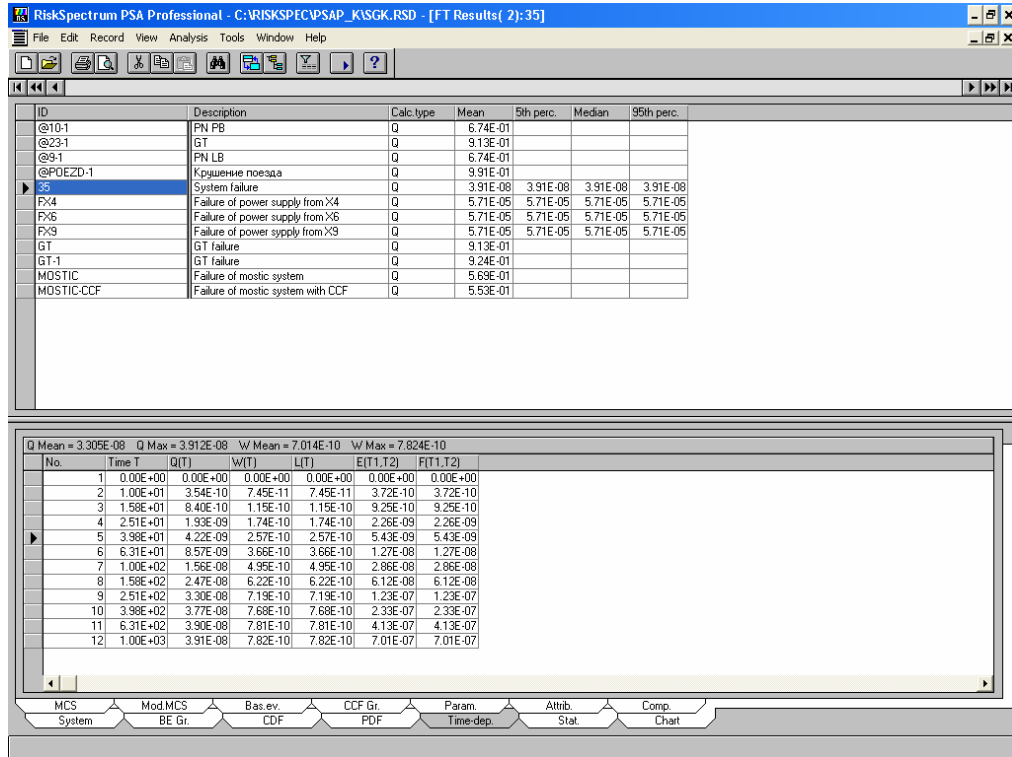


Рис. 2.1.11. Результаты расчета надежности восстанавливаемой СЭС

Для большего удобства анализа полученных результатов моделирования и расчетов они сведены в таблицу 2.1.17:

Таблица 2.1.17.

Средняя наработка до отказа за элементов	Среднее время восстановления элементов	Коэффициент неготовности системы в точке 8760 ч, Q(T)	Частота отказов системы на интервале 0-T, W(T)	Интенсивность отказов системы в точке 8760 ч, L(T)	Ожидаемое число отказов системы на интервале 0-T, E(0.T)	Вероятность появления хотя бы одного отказа системы на интервале 0-T, F(T)
T_i = 1752000 ч (i = 1 ÷ 15)	T_{vi} = 100ч (i = 1 ÷ 15)	3.912E-8	7.824E-10	7.824E-10	7.01E-7	7.01E-7

Эти результаты совпадают с решениями, полученными ПК АСМ (см. табл.2.1.9)

Среднее время простоя при возникновении отказа системы MTTR определяется по формуле:

$$MTTR = \frac{Q(t = \infty)}{W(t = \infty)} \approx 50 \text{ час.}$$

Средняя наработка между отказами MTBF определяется по формуле:

$$MTBF = \frac{1}{W(t = \infty)} = 145903.9508 \text{ лет}$$

Из сравнения данных, представленных в таблицах 2.1.3 и 2.1.17 следует, что величина Hazard Rate аналогична по смыслу величине W(T).

Сравнение полученных результатов с результатами расчетов по ПК АСМ показывает, что при одинаковой надежности элементов СЭС значения таких показателей, как коэффициент неготовности, среднее время простоя (среднее время восстановления) и средняя наработка между отказами близки друг к другу.

Пример 4. Расчет смешанной СЭС с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами

Решение данного примера выполнено на основе того же дерева отказов СЭС (см. рис.2.1.9). Дополнительно приняты следующие условия:

- элементы 1 ÷ 9 – восстанавливаемые;
- элементы 10 ÷ 15 – невосстанавливаемые.

Результаты моделирования и расчетов показателей надежности смешанной СЭС приведены в таблице 2.1.18

Таблица 2.1.18.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность неготовности смешанной системы на интервале и в точке 8760 час.	
		Risk Spectrum	ПК АСМ, табл.2.1.10
$T_i = 1\ 752\ 000\text{ч}, (i = 1 \div 15)$	$T_{vi} = 100\text{ч}, (i = 1 \div 9)$	7.65E-5	7.6328952E-5

Пример 5. Автоматическое определение списка кратчайших путей успешного функционирования СЭС.

В технологии Risk Spectrum построение списка кратчайших путей успешного функционирования СЭС не используется.

Пример 6. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов СЭС.

В таблице 2.1.19 представлен перечень минимальных сечений отказов системы с указанием вероятности реализации каждого МСО и величины вклада каждого сечения в вероятность отказа СЭС (при $q_i = 0.5$).

Минимальные сечения отказов и их характеристики

Таблица 2.1.19.

№№ п/п	Вероятность реализации МСО	Вклад МСО в вероятность отказа системы	Обозначения базисных событий			
			X11	X14		
1	2,50E-01	25,12	X11	X14		
2	2,50E-01	25,12	X14	X4		
3	2,50E-01	25,12	X11	X9		
4	2,50E-01	25,12	X13	X9		
5	2,50E-01	25,12	X10	X6		
6	2,50E-01	25,12	X4	X9		
7	2,50E-01	25,12	X10	X12		
8	2,50E-01	25,12	X15	X6		
9	2,50E-01	25,12	X6	X9		
10	2,50E-01	25,12	X4	X6		
11	2,50E-01	25,12	X13	X15		
12	2,50E-01	25,12	X12	X4		
13	1,25E-01	12,56	X3	X6	X8	
14	1,25E-01	12,56	X2	X3	X4	
15	1,25E-01	12,56	X2	X4	X7	
16	1,25E-01	12,56	X1	X2	X9	
17	1,25E-01	12,56	X2	X5	X9	
18	1,25E-01	12,56	X1	X6	X8	

19	1,25E-01	12,56	X1	X2	X3	
20	1,25E-01	12,56	X1	X5	X9	
21	1,25E-01	12,56	X1	X3	X6	
22	1,25E-01	12,56	X3	X4	X7	
23	6,25E-02	6,28	X10	X2	X5	X7
24	6,25E-02	6,28	X1	X2	X7	X8
25	6,25E-02	6,28	X1	X3	X5	X7
26	6,25E-02	6,28	X2	X3	X5	X8
27	6,25E-02	6,28	X1	X12	X5	X8
28	6,25E-02	6,28	X15	X2	X5	X7
29	6,25E-02	6,28	X11	X3	X7	X8
30	6,25E-02	6,28	X1	X14	X5	X8
31	6,25E-02	6,28	X13	X3	X7	X8

Как показывают результаты расчетов, при изменении значений вероятности отказов элементов относительная величина вкладов сечений в вероятность отказа СЭС не меняется.

Оценка вклада отдельных МСО в вероятность отказа СЭС с помощью кодов Relex и ACM не произведена.

Пример 7. Расчет показателей относительной важности элементов СЭС

В таблице 2.1.20_1 представлены показатели относительной важности базовых событий с позиций надежности всей системы (при $q_i = 0.5$), а в таблице 2.1.20_2 значимости по Веселы-Фасселу для различных вероятностей отказа элементов (при $q_i = 0.5$, $q_i = 0.01$, $q_i = 0.001$).

Показатели относительной важности элементов

Таблица 2.1.20_1.

№№ п/п	Обозначение БС	Вероятность отказа для БС	Значимость по Веселы-Фасселу	Фактор понижения риска для БС	Фактор увеличения риска для БС
1	X4	5,00E-01	7,92E-01	1,02E+00	1,00E+00
2	X9	5,00E-01	7,92E-01	1,02E+00	1,00E+00
3	X6	5,00E-01	7,92E-01	1,02E+00	1,00E+00
4	X3	5,00E-01	6,07E-01	1,01E+00	1,00E+00
5	X2	5,00E-01	6,07E-01	1,01E+00	1,00E+00
6	X1	5,00E-01	6,07E-01	1,01E+00	1,00E+00
7	X7	5,00E-01	4,82E-01	1,00E+00	1,00E+00
8	X5	5,00E-01	4,82E-01	1,00E+00	1,00E+00
9	X8	5,00E-01	4,82E-01	1,00E+00	1,00E+00
10	X13	5,00E-01	4,75E-01	1,00E+00	1,00E+00
11	X14	5,00E-01	4,75E-01	1,00E+00	1,00E+00
12	X15	5,00E-01	4,75E-01	1,00E+00	1,00E+00
13	X10	5,00E-01	4,75E-01	1,00E+00	1,00E+00
14	X11	5,00E-01	4,75E-01	1,00E+00	1,00E+00
15	X12	5,00E-01	4,75E-01	1,00E+00	1,00E+00

**Показатели относительной важности элементов (по Веселы-Фасселу)
при различных вероятностях отказа элементов ЭСС**

Таблица 2.1.20_2

№№ п/п	Обозначение БС	Значимость по Веселы-Фасселу		
		$q_i = 0.5$	$q_i = 0.01$	$q_i = 0.001$
1	X4	7,92E-01	3,33E-01	3,33E-01
2	X9	7,92E-01	3,33E-01	3,33E-01
3	X6	7,92E-01	3,33E-01	3,33E-01
4	X3	6,07E-01	4,17E-03	4,17E-04
5	X2	6,07E-01	4,17E-03	4,17E-04
6	X1	6,07E-01	4,17E-03	4,17E-04
7	X7	4,82E-01	1,70E-03	1,67E-04

8	X5	4,82E-01	1,70E-03	1,67E-04
9	X8	4,82E-01	1,70E-03	1,67E-04
10	X13	4,75E-01	1,65E-01	1,67E-01
11	X14	4,75E-01	1,65E-01	1,67E-01
12	X15	4,75E-01	1,65E-01	1,67E-01
13	X10	4,75E-01	1,65E-01	1,67E-01
14	X11	4,75E-01	1,65E-01	1,67E-01
15	X12	4,75E-01	1,65E-01	1,67E-01

Как следует из данных таблиц 2.1.20_1 и 2.1.20_2, при больших вероятностях отказов элементов значения их относительной (по величине показателя) важности не совпадают с аналогичными (по смыслу) значениями относительной важности элементов, рассчитанными с помощью кода АСМ. При малых вероятностях отказов относительная важность элементов становится одинаковой.

Пример 8. Немонотонная модель функционирования СЭС

В ПК Risk Spectrum функция моделирования показателей надежности немонотонных систем не предусмотрена.

Сводная таблица результатов раздела 2.1. "Оценка надежности Системы электроснабжения (Задача № 35)"					
Примеры	Параметры и характеристики задач		Результаты моделирования и расчетов		
			Relax RBD	ПК АСМ	Risk Spectrum
1	2		3	4	5
Пример 1. Расчет надежности СЭС при заданных вероятностях безотказной работы элементов, независимых от времени ($p_i = 0.5$)	$p_i = 0.5$		0.070862	0.070862	0.005
	$p_i = 0.01$		0.998813	0.998813	0.9879
	$p_i = 0.001$		0.999988	0.999988	0.999988
Пример 2. Расчет надежности невосстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения	Вероятн. безотк. работы	Toi= 2 г.	0.201540	0.201540	0.057
		Toi= 200 л.	0.9997031	0.9997031	0.9997003
	Ср. наработка до отказа (час)		5963.74	5963.808	не вычисляется
	Интенсивность отказов сист. во временной точке 8760 час. (1/час)		287.8818e-6	Не вычисляется	не вычисляется
	Сравнительная точность расчетов		См. табл.2.1.7, табл.2.1.15 и табл.2.1.16		
Пример 3. Расчет восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения	Toi = 2 года, Tvi = 100 час. t = 8760час	Вер. безот. раб. СЭС (t = 8760ч.)	0.9351	0.935118	в ПК Risk Spectrum вычисляются, но результаты не приведены
		Коэффициент готовн.	0.999616	0.99961589	
		Парам. потока отказов	7.6578e-6	Не вычисляется	
		Hazard Rate (величина обратная средней наработке между отказами) (1/час)	7.660775e-6	7.66372e-6	
		Среднее время между отказами (MTBF) (час)	130585. 26	130585.26688	
		Среднее время восст. системы (час).	50.1 7	50. 2	
		Средняя наработка на отказ системы (час)	130535.09	130535. 1	
	Toi = 200 лет, Tvi = 100 час. t = 8760час	Вероятн. отказа СЭС (t = 8760ч.)	6.85e-6	7.0E-6	7.01E-7
		Коэффициент неготовности СЭС.	3.9087e-8	3.9087E-8	(в точке 8760 ч) 3.912E-8
		Ожидаемое число отказов на интерв. 0-T	6.77e-6	Не вычисляется	7.01E-7
		Hazard Rate (1/год)	6,85e-6	6.85e-6	7.824E-10 [1/час]
		Среднее время между отказами (MTBF) (год)	146029.68	146030.21	145903. 9508
		Среднее время восст. системы (час).	50.0015	50.0015	50
		Средняя наработка на отказ системы (год)	146029.68	146030.2	145953.9508
Интенсивность (частота) отказов (1/год)	6.83e-6	7.0E-6	(на интерв.0-T) 7.824E-10 [1/час]		
Пример 4. Расчет смешанной СЭС с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами	Toi = 2 года, Tvi = 100 час. t = 8760час	Коэффициент (вероятность) готовности СЭС	0.598753	0.59875283	в ПК Risk Spectrum вычисляются, но результаты не приведены
		Парам. потока отказов	108.07e-6	Не вычисляется	
		Вер. безот. раб. СЭС (t = 8760ч.)	0.39	Не вычисляется	
	Toi = 200 лет, Tvi = 100 час. t = 8760час	Коэффициент (вероятность) не готовности СЭС	7,63e-5	7.633E-5	7.65E-5
Пример 5. Автоматическое определение списка минимальных путей СЭС	Количество КПУФ	Логические модели совпали		не определяется	
		92	92		

1	2	3	4	5
Пример 6. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов СЭС	Количество МСО	<i>Логические модели совпали</i>		
	Оценка вкладов СО	31	31	31
		не вычисляется	не вычисляется	См. табл.2.1.19
Пример 7. Расчет значимостей и вкладов элементов СЭС		вычисления не проводились	<i>Показатели не совпали</i>	
			См. табл.2.1.11	См. табл.2.1.20
Пример 8. Немонотонная модель функционирования СЭС	Логическая модель частичн. отказа СЭС	34 конъюнкции	34 конъюнкции	не определяется
	Вероятностная модель частичн. отказа СЭС	не определяется	57 одночленов	
	Вероятность частичн. отказа СЭС	0.0742798	0.0742797852	
	Оценки значимости и вкладов элементов	вычисления не проводились	См. табл.2.1.12 и рис.2.1.9	

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.1

Выводы специалистов ИПУ РАН

Примеры данного раздела направлены, в основном, на проверку точности вычисления и удобства, наглядности задания модели системы. Причем рассматривается классическая логико-вероятностная модель системы. Исключения составляют лишь вычисления некоторых показателей, напр., вероятность отказа (безотказной работы), для случаев, когда эти показатели напрямую не могут быть вычислены логико-вероятностными методами.

Так как для логико-вероятностных моделей алгоритмы ПК АСМ и ПК Relex являются точными, то все основные результаты совпали. В ПК Risk Spectrum реализован приближенный метод вычисления, который дает большие погрешности при низкой надежности элементов. Поэтому для некоторых примеров разница в вычисляемых показателях существенна. Немонотонные задачи пока в ПК Relex решаются только с использованием деревьев. Но, по имеющейся у нас информации, в ближайшее время логическое отрицание будет введено в RBD (оно уже введено в PBD (фазовые диаграммы), мы просто не предлагали немонотонную задачу на фазовые диаграммы).

Недостатком ПК Risk Spectrum является также ориентация на задание модели только в виде дерева. Трудоемкость построения и проверок модели в виде дерева для разветвленных систем может быть весьма высока. В ПК Relex модели могут формироваться как в виде блок-схем (что удобно и естественно при близости функциональной и надежностной схем), так и в виде деревьев отказа, успеха (что удобно при отсутствии явно выраженных функциональных физических связей). Причем задание модели в виде блок-схем в ПК Relex с использованием функций «размножителя» (junction) значительно расширяет возможности классических блок-схем надежности. Технология схем функциональной целостности, реализованная в ПК АСМ, очень удобна и наглядна. Она объединяет лучшие стороны блок-схем и деревьев отказов, успехов.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Важной отличительной чертой различных технологий автоматизированного моделирования является вид структурных схем, которые используются при постановке задач. От трудоемкости их разработки во многом зависит эффективность практического применения технологий и программных комплексов автоматизированного моделирования на предприятиях. В рамках рассмотренной задачи специалистам ОАО "СПИК СЗМА" более удобным и перспективным представляется графический аппарат схем функциональной целостности технологии и ПК АСМ. Как видно из примера, СФЦ рассматриваемой СЭС, изображенная на рис.2.1.6, является прямым подобием исходной функциональной схемы, приведенной на рис.2.1.1, и ее построение не вызывает затруднений. Не более сложным представляется построение блок-схемы СЭС графическими средствами редактора Relex RBD, изображенной на рис.2.1.2. Следует отметить, что очень полезным в графах блок-схем технологии "RELEX" является символ "коннектора", с помощью которого задается любая комбинаторная логика заходящих дуг. Значительно менее удобным и существенно более трудоемким для структурного описания данной задачи является графический аппарат деревьев отказов, используемый в ПК Risk Spectrum (см. рис. 2.1.10).
2. Результаты решения примеров данного раздела показали, что логическая полнота и универсальность графических средств СФЦ и соответствующего метода, алгоритма и программного модуля определения логических функций работоспособности систем [10, 11] позволяет представлять и решать с помощью ПК АСМ все задачи, представляемые как блок-схемами, так и деревьями отказов.

3. Все сопоставимые результаты решения примеров 1 – 6 (21 показатель и 2 логические модели), полученные ПК Relex RBD и ПК АСМ полностью совпали.
4. С помощью ПК АСМ в настоящее время не вычисляется ряд показателей надежности систем:
 - i. интенсивность отказов невосстанавливаемой системы во временной точке (см. Пример 1);
 - ii. параметр потока отказов восстанавливаемой системы (см. Примеры 3 и 4);
 - iii. вероятность безотказной работы смешанной системы (см. Пример 4);
 - iv. оценка вкладов сечений отказов (см. Пример 6).

Реализация методов расчета указанных показателей в программные средства технологии АСМ не представляет большой сложности.

5. В рамках данной задачи с помощью ПК АСМ решены все примеры, реализуемые ПК Risk Spectrum. Логические модели надежности в форме сечений отказов (см. Пример 6) полученные с помощью ПК Relex RBD, ПК АСМ полностью совпали с результатами ПК Risk Spectrum. Совпадение результатов расчетов системных показателей наблюдается только в случаях, когда исходные вероятности отказов элементов $q_i \leq 0.001$, что отмечено в документации на этот программный комплекс [16, 17]. В противном случае ($q_i > 0.001$) расхождения в расчетах показателей надежности, выполненных с помощью ПК Relex RBD, ПК АСМ могут существенно отличаться от результатов, полученных с помощью ПК Risk Spectrum. Вероятно поэтому специалисты СПБАЭП не стали проводить вычисления для всех рассмотренных в данном разделе НИР примеров, а ограничились только анализом СЭС с высоконадежными Элементами. Это ухудшило сравнимость результатов исследования. Поэтому мы вычислили с помощью ПК АСМ и эти варианты рассмотренных примеров. Большинство вариантов расчетов показателей надежности СЭС с высоконадежными элементами, выполненные на ПК АСМ и на ПК Risk Spectrum совпали. Неясными оказались расхождения только двух показателей Примера 3: вероятности отказа восстанавливаемой СЭС и ее интенсивности (частоты) отказов.
6. Несовпадение оценок роли элементов систем в ПК АСМ и ПК Risk Spectrum обусловлено, по нашему мнению, различиями в их содержательной трактовке и, следовательно, разными алгоритмами расчетов. ОАО СПИК СЗМА планирует выполнить соответствующие доработки в ходе планового развития ПК АСМ СЗМА.
7. Впервые правильность результатов немонотонного моделирования, полученных с помощью ПК АСМ СЗМА, была подтверждена решением Relex Fault Tree (пример 8). Однако, по нашему мнению, трудоемкость решения этого класса задач средствами Relex Fault Tree с помощью деревьев отказов, крайне высока. Здесь требуется для каждого немонотонного критерия умозрительно строить соответствующее немонотонное и очень большое дерево (см. рис.2.1.2.б). В технологии АСМ этого не требуется. Используется обычная СФЦ (см. рис.2.1.6), а немонотонный критерий может быть произвольного вида и сложности. С помощью универсального программного модуля ЛОГ [10] решение формируется автоматически и может иметь очень высокую размерность. Специалисты СПИК СЗМА считают очень перспективной возможность построения методами и программными средствами технологии АСМ не только всех видов монотонных, но и принципиально нового класса немонотонных моделей надежности, безопасности и риска сложных системных объектов и процессов.

Выводы специалистов СПБАЭП

1. При низкой собственной надежности элементов СЭС ПК Relex и ПК АСМ позволяют получать точные значения показателей надежности системы в целом. ПК Risk Spectrum позволяет получать консервативные (завышенные) оценки вероятности отказа системы. Приемлемая сходимость результатов расчетов по Risk Spectrum с результатами расчетов по другим кодам начинает достигаться при задании вероятности отказа элементов не более 0.001, что указано в технической документации Risk Spectrum.

Т.о. при моделировании показателей надежности технических систем коды Relex и АСМ позволяют получать точные результаты, а код Risk Spectrum - приемлемые по точности результаты, при условии задания вероятностей отказа элементов не более 0.001. При моделировании надежности персонала (вероятности ошибок персонала значительно выше вероятностей отказа технических средств) или надежности сложных эргатических систем, где роль персонала весьма высока, код Risk Spectrum дает чрезмерно завышенные (консервативные) оценки вероятности отказа системы, что может приводить к неверным проектным решениям. Например, может быть принято решение о вводе в состав АЭС дополнительных систем безопасности, что, естественно, увеличит сложность проекта и стоимость АЭС.

2. В кодах Relex и Risk Spectrum более удобно, чем в ПК АСМ, реализована возможность расчетов показателей надежности для заданных интервалов времени.

3. Все три кода позволяют рассчитывать показатели надежности восстанавливаемых систем, а также систем, состоящих из восстанавливаемых и не восстанавливаемых элементов.

4. Коды АСМ и Risk Spectrum позволяют получать расчетные оценки показателей относительной важности элементов системы с позиций надежности системы в целом. В описании основ теории, лежащей в основе работы кода Relex указано, что такие показатели также могут рассчитываться, однако в результатах решения рассматриваемой задачи соответствующие данные не представлены.

5. Коды АСМ и Relex позволяют получать как списки кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ), так и списки минимальных сечений отказов. Код Risk Spectrum позволяет получать только списки минимальных сечений отказов. Все три кода генерируют идентичные списки минимальных сечений отказов.

6. Код АСМ позволяет решать как прямую (расчет вероятности безотказной работы), так и обратную (расчет вероятности отказа) задачи без перестройки модели. При этом возможно задание практически не ограниченного количества критериев успеха, неуспеха, и любых промежуточных (немонотонных) режимов функционирования. При использовании кода Risk Spectrum необходимо строить отдельную модель для расчета вероятности отказа и отдельную модель для расчета вероятности успеха. Каким образом решается данная задача при использовании кода Relex из представленных материалов не ясно.

2.2. Расчет надежности системы с резервированием по схеме «К из N».

2.2.1. Описание задачи

Задача состоит в автоматическом моделировании и расчете вероятности безотказной работы комбинаторных подсистем, состоящих из N однотипных элементов. Работоспособность комбинаторной подсистемы определяется безотказной работой не менее K элементов из общего числа элементов N (9 из 15; 15 из 22; 21 из 38). Рассматривается режим нагруженного резервирования.

2.2.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Пример 1. Расчет звеньев с заданными вероятностями безотказной работы элементов, независимыми от времени

На рис. 2.2.1. приведена блок-схема надежности комбинаторной подсистемы, представленная средствами редактора графического ввода Relex RBD с параметрами для случая 21 из 38 с параллельно работающими в нагруженном режиме элементами. Аналогично представляются в Relex RBD комбинаторные подсистемы с другими параметрами.

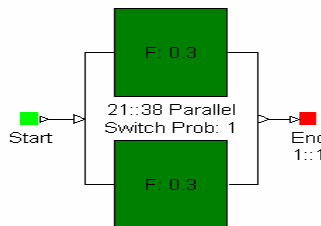


Рис. 2.2.1. Блок-схема комбинаторной подсистемы 21 из 38

Результаты расчетов вероятности безотказной работы вариантов комбинаторных подсистем приведены в таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1.

Вероятность безотказной работы элементов	Критерий работоспособности	Вероятность безотказной работы системы
$P_i = 0.7 (i = 1 \div 15)$	9 из 15	0.868857
$P_i = 0.7 (i = 1 \div 22)$	15 из 22	0.671251
$P_i = 0.7 (i = 1 \div 38)$	21 из 38	0.982005
$P_i = 0.3 (i = 1 \div 15)$	7 из 15	0.131143
$P_i = 0.1 (i = 1 \div 15)$	7 из 15	3,10631e-4
$P_i = 0.01 (i = 1 \div 15)$	7 из 15	5.99831e-11
$P_i = 0.001 (i = 1 \div 15)$	7 из 15	6.39009e-18
$P_i = 0.0001 (i = 1 \div 15)$	7 из 15	6.43050e-25
$P_i = 0.00001 (i = 1 \div 15)$	7 из 15	6.43455e-32

Пример 2. Расчет надежности невозстанавливаемого звена с резервированием замещением и с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения

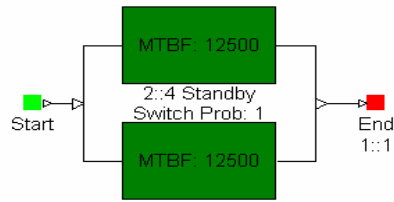


Рис.2.2.2. Блок-схема системы с резервированием замещением

На рисунке 2.2.2 приведена соответствующая блок-схема надежности из Relex RBD с 2 элементами, работающими в нагруженном режиме, и двумя элементами, реализующими резервирование замещением. Параметр $0\% \leq \alpha \leq 100\%$ определяет степень нагруженности резерва. При значениях α , отличных от граничных (0, 100), Relex автоматически подключает ускоренное статистическое моделирование Монте-Карло.

Таблица 2.2.2.

$\alpha = 100$		$\alpha = 50$		$\alpha = 20$		$\alpha = 0$	
Вер-ть безотк. работы звена 0÷13140ч	Средняя наработка до отказа (ч)	Вер-ть безотк. работы звена 0÷13140ч	Средняя наработка до отказа (ч)	Вер-ть безотк. работы звена 0÷13140ч	Средняя наработка до отказа (ч)	Вер-ть безотк. работы звена 0÷13140ч	Средняя наработка до отказа (ч)
0.436164	13541.7	0.526078	15416.7	0.595357	17140.1	0.648983	18750
Для $T_{0i}=1\ 250\ 000$							
0.999995462	1354166,7						

Пример 3. Расчет невозстанавливаемого звена со скользящим резервированием с заданной интенсивностью отказов элементов в предположении экспоненциального распределения

Звено состоит из двух последовательно соединенных элементов и скользящего резерва замещением. Степень нагруженности скользящего резерва произвольна.

Блок-схема надежности приведена на рис. 2.2.3. При наборе блок-схемы были использованы повторяющиеся (repeated) элементы Relex RBD. При значениях α , отличных от граничных (0, 100), Relex автоматически подключает ускоренное статистическое моделирование Монте-Карло.

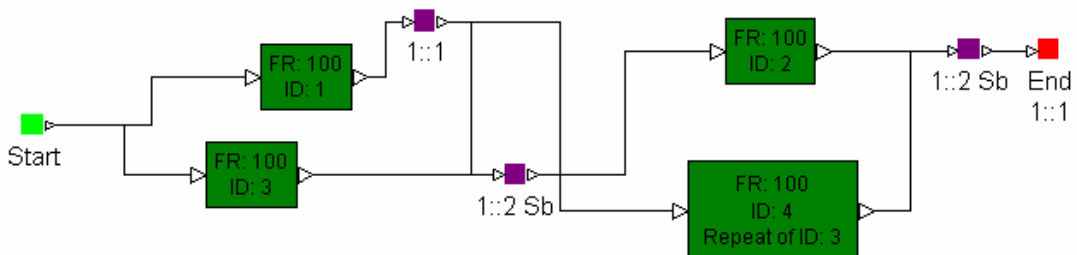


Рис.2.2.3. Блок-схема системы со скользящим резервированием

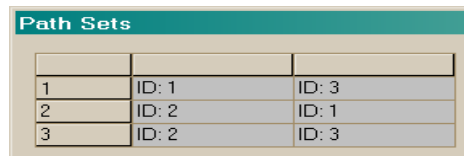
Результаты расчета представлены с таблице 2.2.3

Таблица 2.2.3.

	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-4}$	$\alpha = 20, \lambda = 10^{-4}$
Вероятность безотказной работы звена на интервале (0 ÷ 8760 ч)	0.375835	0.452762
95% доверительный интервал		0.453738 - 0.451786
Средняя наработка до отказа звена (ч)	8333.3	9547.8
95% доверительный интервал		9561 - 9535
	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-4}$	$\alpha = 20, \lambda = 10^{-4}$
Вероятность безотказной работы звена на интервале (0 ÷ 10000ч)	0.3064	0.3813
95% доверительный интервал		
Средняя наработка до отказа звена (ч)	8333.3	9547.8
95% доверительный интервал		9561 - 9535
	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-6}$	$\alpha = 20, \lambda = 10^{-6}$
Вероятность отказа звена на интервале (0 ÷ 10000 ч)	2.95 e-4	2.17e-4
95% доверительный интервал		
Средняя наработка до отказа звена (ч)	833333	954534
95% доверительный интервал		

Пример 4. Автоматическое определение списка минимальных путей

На рис.2.2.4 приведен список минимальных путей для звена со скользящим резервированием, рассмотренного в Примере 2.2.3.



Path Sets		
1	ID: 1	ID: 3
2	ID: 2	ID: 1
3	ID: 2	ID: 3

Рис.2.2.4. Список минимальных путей звена со скользящим резервированием

2.2.3. Результаты решения НА ПК «АСМ»

Пример 1. Расчет звеньев с заданными вероятностями безотказной работы элементов, независящими от времени

Рассматриваются три варианта однородных головных комбинаторных подсистем 9/15, 15/22 и 21/38, функционирующие в режиме нагруженного резервирования. Все элементы имеют одинаковую вероятность безотказной работы $p_i = 0.7$. Результаты расчетов вероятности безотказной работы указанных звеньев приведены в табл.2.2.4.

Таблица 2.2.4.

Вероятность безотказной работы элементов	Вариант комбинаторной подсистемы (звена) K / N	Вероятность безотказной работы звена		
		ПК АСМ	Relex RBD (см. табл.2.2.1.)	Risk Spectrum
$p_i = 0.7$ ($i = 1 \div 15$)	9 / 15	$P_{9/15} = 0.868857426616879$	$P_{9/15} = 0.868857$	нет решения
$p_i = 0.7$ ($i = 1 \div 22$)	15 / 22	$P_{15/22} = 0.67125067650956$	$P_{15/22} = 0.671251$	нет решения
$p_i = 0.7$ ($i = 1 \div 38$)	21 / 38	$P_{21/38} = 0.982005145944627$	$P_{21/38} = 0.982005$	нет решения

В целях сравнительного анализа, в трех правых столбцах таблицы приведены результаты расчетов, выполненные программными средствами ACM, Relex RBD и Risk Spectrum. Результаты ACM и Relex RBD совпали полностью. Результат, полученный с помощью ПК Risk Spectrum, существенно отличается. Возможно, это обусловлено использованием в ПК Risk Spectrum приближенных методов расчета вероятностных показателей.

В технологии ACM вычисления указанных характеристик производились с помощью расчетной утилиты Aggregation_k_of_n. Вид рабочего окна этой утилиты приведен на рисунке 2.2.5.

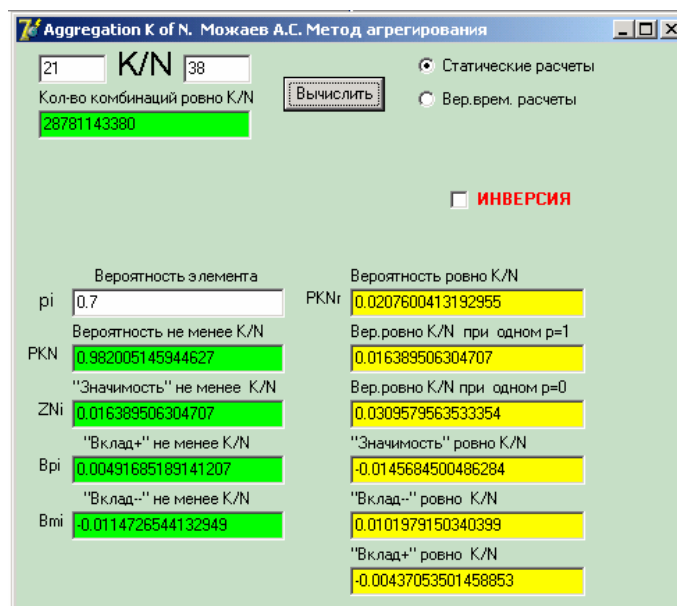


Рис. 2.2.5. Рабочее окно утилиты Aggregation_k_of_n

Пример 2. Расчет надежности невозстанавливаемого звена с резервированием замещением и с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения

Рассматривается комбинаторная подсистема (звено) 2/4 (два из четырех). Средние наработки до отказа всех элементов этой системы одинаковы и составляют $T_{0i} = 12500$ час. (1.427 год). Требуется рассчитать вероятность безотказной работы этого комбинаторного звена $P_{2/4}(13140$ час), при условии нагруженного резервирования.

Решение данной задачи в технологии АСМ выполнено тремя способами.

8. Непосредственно с помощью ПК АСМ. На рисунке 2.2.6 изображено рабочее окно ПК АСМ СЗМА с результатами решения этого примера.

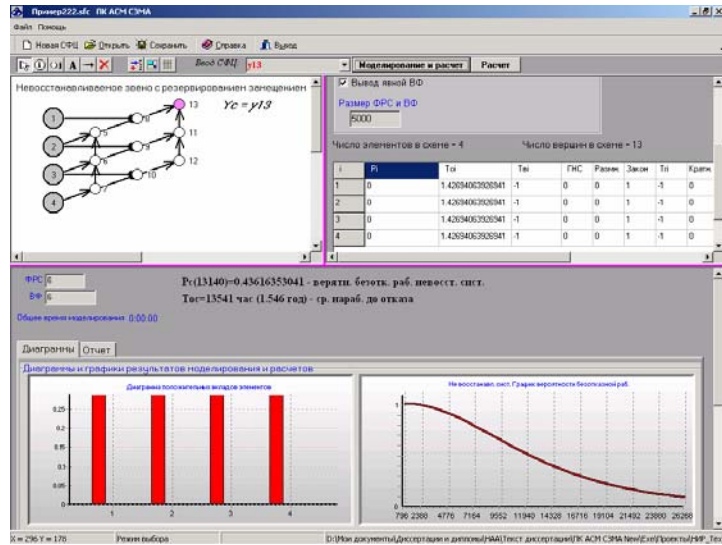


Рис. 2.2.6. Рабочее окно ПК АСМ СЗМА

9. С помощью расчетной утилиты Aggregation_k_of_n:

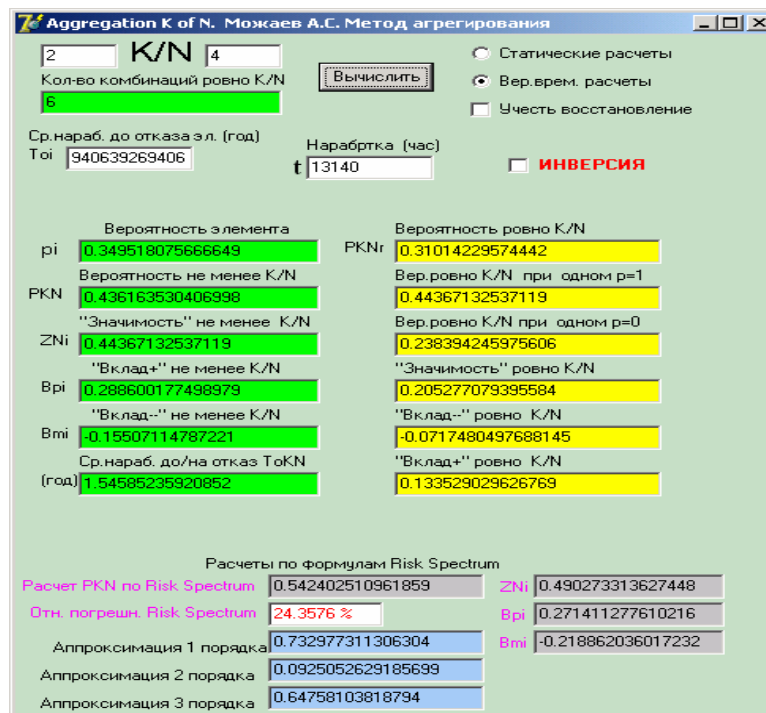


Рис. 2.2.7. Рабочее окно утилиты Aggregation_k_of_n

10. С помощью моделирующей утилиты Plotter_k_of_n:

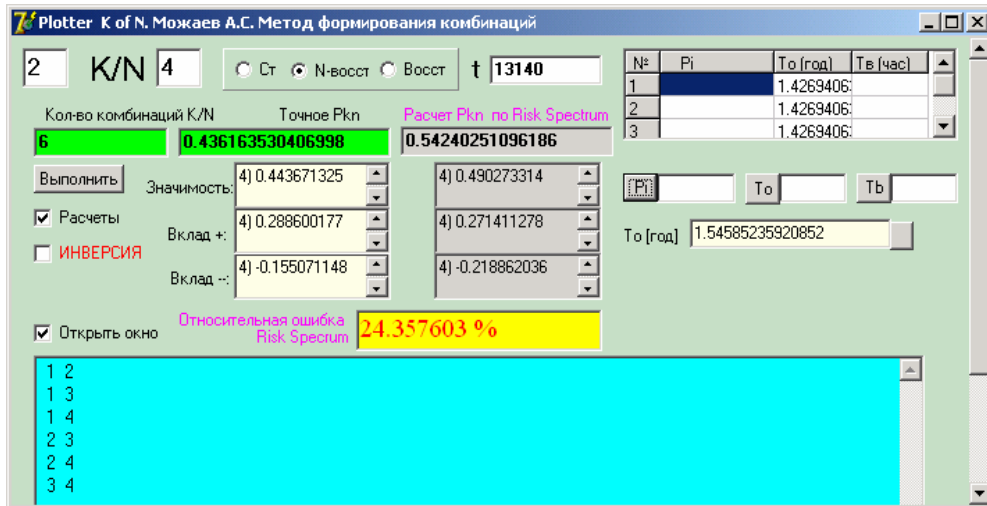


Рис.2.2.8. Рабочее окно утилиты Plotter_k_of_n

Результаты расчетов данного примера методами и средствами, реализованными в технологии АСМ, приведены в таблице 2.2.5.

Таблица 2.2.5.

Средняя наработка до отказа элементов	Наработка	Вариант комбинационной подсистемы (звена) K/N	Характеристики надежности комбинационной подсистемы
$T_{O_i} = 12500 \text{ час.} = 1.426941 \text{ год.}$	$t = 13140 \text{ час.}$	2 / 4	$P_{2/4}(t) = 0.436163530406998$ $Q_{2/4}(t) = 0.563836469593002$ $\xi_i = 0.44367132537119$ $\beta_i^- = -0.15507114787221$ $\beta_i^+ = 0.288600177498979$ $T_{O(2/4)} = 13541.666 \text{ ч}$
$T_{O_i} = 1250000 \text{ час.} = 142.6941 \text{ год.}$	$t = 13140 \text{ час.}$	2 / 4	$P_{2/4}(t) = 0.999995462103141$ $Q_{2/4}(t) = 4.538\text{E-}6$

Результаты расчетов для $T_{O_i}=12500$ час совпали с решением данного примера, выполненного с помощью модуля Relex RBD для варианта, когда параметр степени нагруженности резерва $\alpha = 100\%$ (см. табл.2.2.2). Результаты решения этой задачи специалистами СПБАЭП с помощью ПК Risk Spectrum не приведены.

В последней строке табл.2.2.5 приведены результаты решения данной задачи средствами технологии АСМ для средней наработки до отказа элементов увеличенной до значения $T_{O_i} = 1250000 \text{ час.}$ (142.6941 год), при $\alpha = 100\%$.

Для этого варианта задачи с помощью Risk Spectrum вычислены только значения приближенных вероятностей отказа данного звена $Q_{3/4}(12500) = 0.7241$ и $Q_{3/4}(1250000) = 4.587\text{E-}6$ (см. табл.2.2.8).

Первая вероятность **0.7241** полученная с помощью ПК Risk Spectrum существенно отличается от результата, полученного в модуле Relex RBD и ПК АСМ

$$Q_{2/4}(t) = 0.563836469593002 = 1 - 0.436163530406998.$$

Второй результат расчетов **4.587E-6**, для $T_{oi}=1250000$ час., полученный в ПК Risk Spectrum, практически совпадает результатом решения этого варианта задачи с помощью ПК АСМ - **4.538E-6** (см. последнюю строку в табл.2.2.8).

В ПК АСМ расчеты показателей надежности невосстанавливаемых систем с разной степенью нагруженности резерва в настоящее время не выполняются.

Пример 3. Расчет невосстанавливаемого звена со скользящим резервированием с заданной интенсивностью отказов элементов в предположении экспоненциального распределения

Звено состоит из двух последовательно соединенных элементов и скользящего резерва замещением. Степень нагруженности $\alpha = 100\%$. Интенсивность отказов элементов $\lambda_i = 10^{-4}[1/\text{час}] = 0.876[1/\text{год}]$; $T_{oi} = 1.14155251$ год. Решение этого примера с помощью ПК АСМ СЗМА приведено на рисунке 2.2.9.

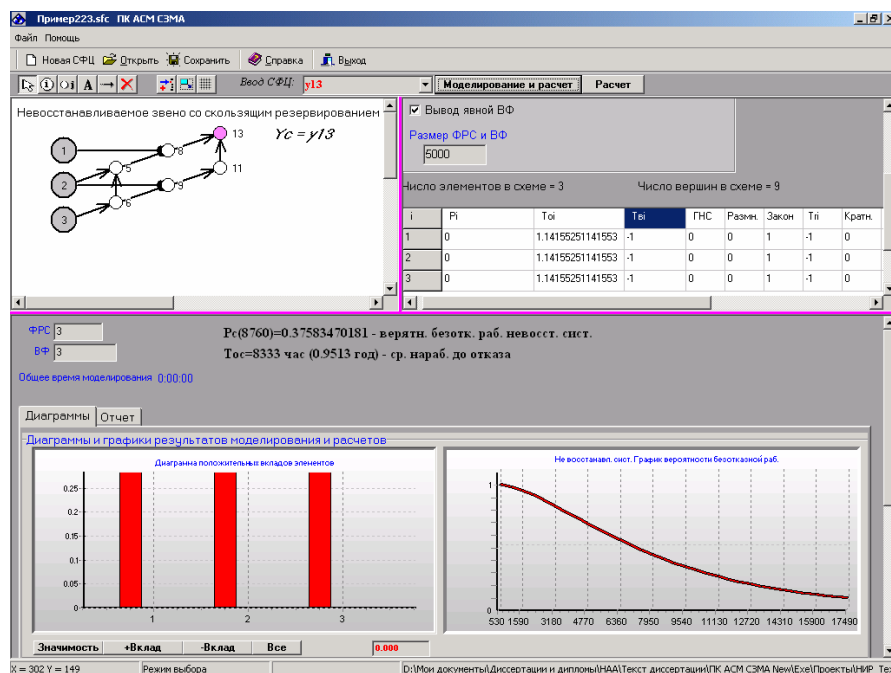


Рис. 2.2.9. Результаты расчетов с помощью ПК АСМ СЗМА

Таблица.2.2.6.

	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-4}$
Вероятность безотказной работы звена на интервале (0 ÷ 8760 ч)	0.375835
Значимости и вклады элементов	$\xi_i = 0.48603725$
	$\beta_i^- = -0.20240796$ $\beta_i^+ = 0.2836292$
Средняя наработка до отказа звена (час)	8333.3

Такие же результаты получены при решении данного примера с помощью утилит Aggregation_k_of_n и Plotter_k_of_n.

Расчеты вероятностей безотказной работы и средней наработки до отказа совпали с решениями, полученными с помощью модуля Relex RBD (см. табл.2.2.3) для варианта, когда параметр степени нагруженности резерва $\alpha = 100\%$.

Для указанной в табл.2.2.6 наработки системы 8760 час (1 год) решение этой задачи на Risk Spectrum не проводилось. Поэтому в следующих таблицах приведены результаты решения этой задачи на ПК АСМ, со значениями параметров, которые использовали специалисты СПБАЭП при моделировании на ПК Risk Spectrum.

АСМ-аналог таблицы 2.2.9.

	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-4}$
Вероятность отказа звена на интервале 10 000 ч	0.6936
Средняя наработка до отказа (час)	8333.3
Значимость элемента	$\xi_i = 0.4651$

АСМ-аналог таблицы 2.2.10.

	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-6}$
Вероятность отказа звена на интервале 10 000 ч	2.95047E-4
Средняя наработка до отказа (час)	833338.8
Значимость элемента	$\xi_i = 0.0197$

Сравнение этих результатов с решениями, полученными на ПК Risk Spectrum (см. табл.2.2.9 и табл. 2.2.10) показывают:

- При $\lambda = 10^{-4}$ имеет место существенное расхождение расчетов вероятности отказов (на АСМ получено **0.6936**, а на Risk Spectrum получено **0.7835**). Примерно также различаются показатели значимости элементов (0.4651 и 0.632 соответственно).

- При $\lambda = 10^{-6}$ расхождение в расчетах вероятности отказов значительно сократилось (на АСМ получено **2.951E-4**, а на Risk Spectrum получено **2.97-4**). Однако расхождение значимостей элементов сохранилось (0.0197 и 9.95E-3 соответственно).

В ПК АСМ расчеты надежности систем с параметром нагруженности $\alpha < 100\%$ в настоящее время не выполняются.

Пример 4. Автоматическое определение списка минимальных путей

Автоматически сформированный ПК АСМ СЗМА список минимальных путей, для звена, рассмотренного в предыдущем примере, приведен на рисунке 2.2.10.

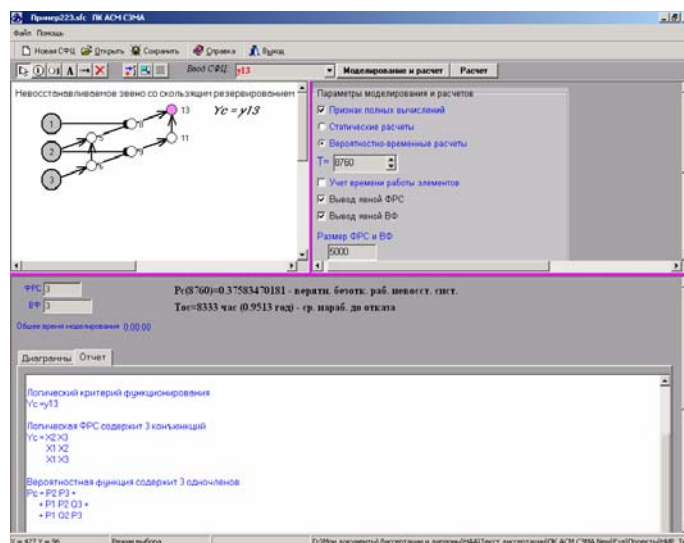


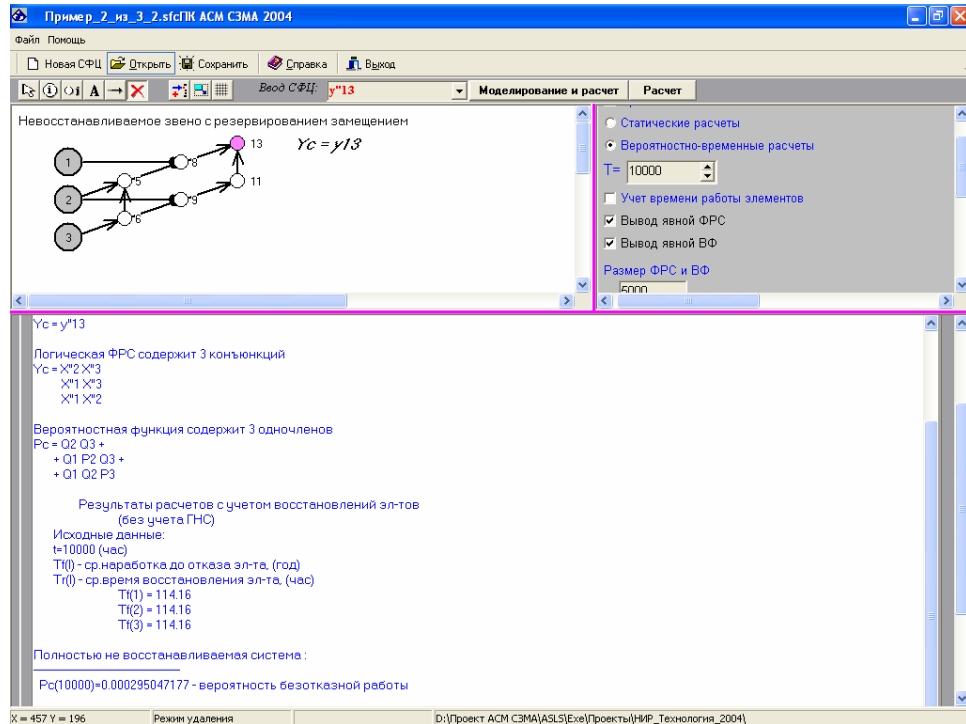
Рис. 2.2.10. Результаты моделирования с помощью ПК АСМ СЗМА

В данном примере минимальных путей всего три:

$$x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3$$

Этот список точно совпал с решением данного примера, полученным с помощью модуля Relex RBD (см. рис.2.2.4) и ПК Risk Spectrum (см. рис. 2.2.13).

С помощью ПК Risk Spectrum минимальные пути функционирования рассматриваемого звена со скользящим резервированием не определялись. Вместо этого были определены минимальные сечения отказов (см. рис.2.2.13). Выполняя решение этой задачи на ПК АСМ СЗМА получаем



Полученный набор минимальных сечений составил

$$x^2 \cdot x^3 \vee x^1 \cdot x^3 \vee x^1 \cdot x^2$$

Это точно совпадает с набором сечений отказов данной системы, полученным с помощью ПК Risk Spectrum (см. рис.2.2.13)

2.2.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

Пример 1. Расчет звеньев с заданными вероятностями безотказной работы элементов, независимыми от времени.

Дерево отказов для варианта «7 из 15» представлено на рисунке 2.2.10.

Примечание: Поскольку здесь решается обратная задача, то и критерий отказа противоположен критерию успеха (для отказа системы необходим отказ не менее 7 элементов).

Результаты расчетов вероятности отказа системы представлены в таблице 2.2.7.

Таблица 2.2.7.

Вероятность безотказной работы элементов	Вариант комбинаторной подсистемы (звена) K/N	Вероятность отказа, вычисленная	
		ПК Risk Spectrum	ПК АСМ
$q_i = 0.3$ ($i = 1 \div 15$)	7/15	0.7552	0.131
$q_i = 0.1$ ($i = 1 \div 15$)	7/15	6.433E-4	3.106E-4
$q_i = 0.01$ ($i = 1 \div 15$)	7/15	6.435E-11	5.998E-11
$q_i = 0.001$ ($i = 1 \div 15$)	7/15	6.435E-18	6.390E-18
$q_i = 0.0001$ ($i = 1 \div 15$)	7/15	6.435E-25	6.430E-25
$q_i = 0.00001$ ($i = 1 \div 15$)	7/15	6.435E-32	6.4345E-32

Как видно из таблицы 2.2.7, при собственной вероятности отказа всех элементов $q_i = 0.3$, результаты расчета вероятности отказа мажоритарной системы K/N , вычисленные с помощью ПК Risk Spectrum, существенно отличаются от аналогичных результатов, полученных с помощью ПК Relex и АСМ СЗМА.

Результаты расчетов с помощью кодов Risk Spectrum и Relex / АСМ начинают приближаться друг к другу только после задания достаточно малой вероятности отказа элементов - $q_i = 0.001$.

Расчет других вариантов K/N (15 из 22 и 21 из 38) на ПК Risk Spectrum - невозможен вследствие программного ограничения на количество подобных комбинаций.

Пример 2. Расчет надежности невозстанавливаемого звена с резервированием замещением и с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.

Дерево отказов для данного примера приведено на рис. 2.2.11. Результаты расчетов при условии отказа не менее 3 элементов из 4 приведены в таблице 2.2.8.

Таблица 2.2.8.

Средняя наработка до отказа элементов, T_{0i} , час	Нарботка, T , час	Вариант комбинаторной подсистемы (звена) K/N	Характеристики надежности комбинаторной подсистемы
12 500	13140	3/4	0.7241
1 250 000	13140	3/4	4.587E-6

Расчеты показателей надежности невозстанавливаемых систем с разной степенью нагруженности резерва в ПК Risk Spectrum не выполняются.

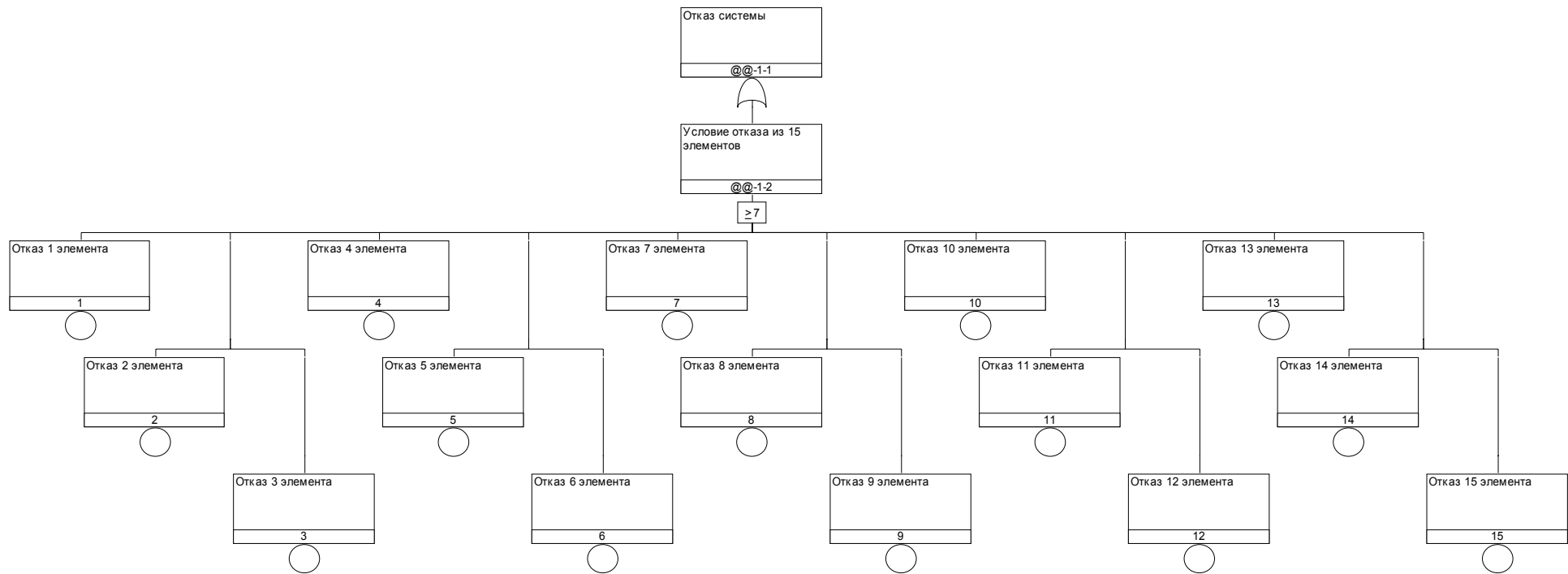


Рисунок 2.2.10. Дерево отказа для системы с мажоритарным резервированием «9 из 15»

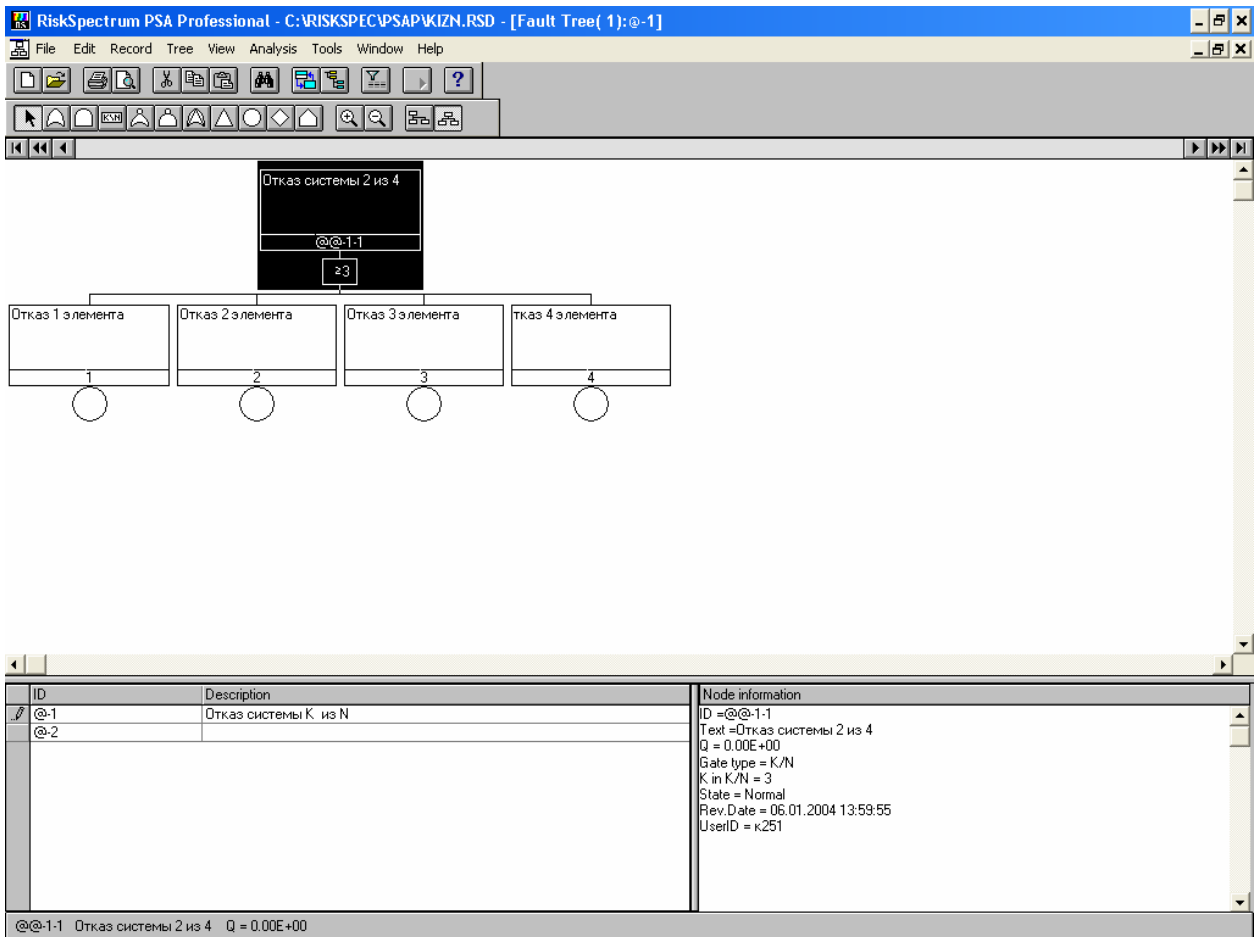


Рис. 2.2.11. Дерево отказов для системы 2 из 4

Пример 3. Расчет невозстанавливаемого звена со скользящим резервированием с заданной интенсивностью отказов элементов в предположении экспоненциального распределения

Дерево отказов для системы из 3-х элементов со скользящим резервированием представлено на рисунке 2.2.12.

Результаты расчетов приведены в таблицах 2.2.9 и 2.2.10.

Таблица 2.2.9.

	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-4}$
Вероятность отказа звена на интервале 10 000 ч	0.7835
Значимости по Fussell-Vesely	$\xi_i = 0.632$

Таблица 2.2.10.

	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-6}$
Вероятность отказа звена на интервале 10 000 ч	2.97E-4
Значимости по Fussell-Vesely	$\xi_i = 9.95E-3$

При более высокой надежности элементов системы ($\lambda = 10^{-6}$) расчеты с помощью ПК АСМ СЗМА дают следующий результат: $Q_c = 2.9504718E-4$. Т.о. подтверждаются выводы, полученные ранее. Результаты расчетов с помощью ПК Risk Spectrum начинают

приближаться к результатам, полученным с помощью ПК АСМ, при вероятности безотказной работы элементов не менее 0.99.

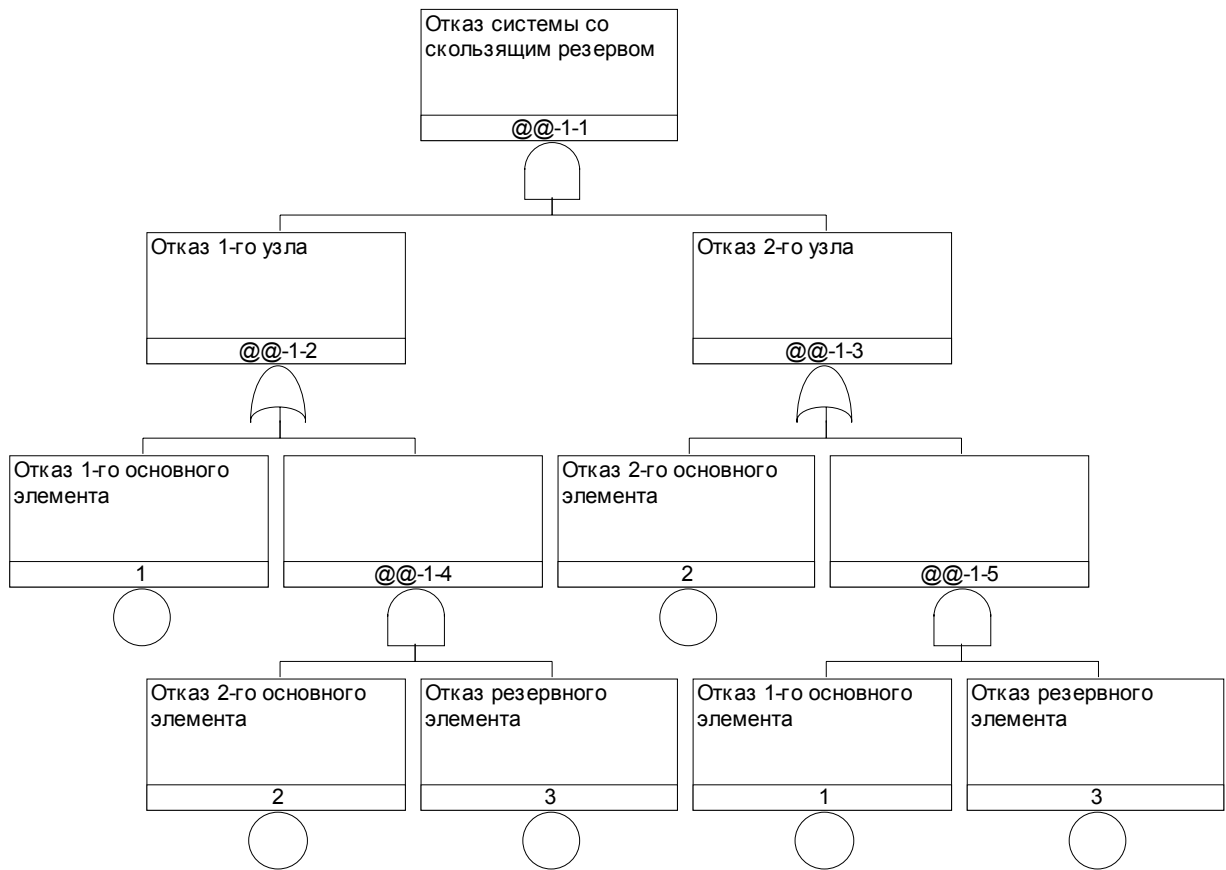


Рис. 2.2.12. Дерево отказов для системы со скользящим резервированием

Пример 4. Автоматическое определение списка минимальных сечений

Автоматически сформированный ПК Risk Spectrum список минимальных сечений отказа для звена, рассмотренного в предыдущем примере, приведен на рисунке 2.2.13.

MCS Editor: @@-1-1						
File Edit Cutset Events Help						
Minimal Cut Sets						
No.	Вероятность МСО	Выход МСО	Событие 1	Событие 2	Event 3	
1	3,405E-01	47,75	1	3		
2	3,405E-01	47,75	2	3		
3	3,405E-01	47,75	1	2		

Рис. 2.2.13. Список минимальных сечений для системы со скользящим резервом

В данном примере минимальных сечений отказа три:

$$\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$$

Нетрудно видеть, что все сечения являются инверсией КПУФ, полученных с помощью других кодов. Результаты решения обратной задачи с помощью ПК АСМ дают те же самые МСО.

Сводная таблица результатов раздела 2.2. "Расчет надежности системы с резервированием по схеме «К из N»"								
Примеры	Параметры и характеристики задач	Результаты моделирования и расчетов						
		Relex RBD	ПК ACM	Risk Spectrum				
1	2	3	4	5				
<p>Пример 1. Расчет звеньев с заданными вероятностями безотказной работы элементов, независимыми от времени ($p_i = 0.7$)</p>	9 из 15	0.868857	0.868857	в Risk Spectrum вычисляются, но результаты не приведены				
	15 из 22	0.671251	0.671251					
	21 из 38	0.982005	0.982005					
	7 из 15	$q_i = 0.3$	0.131143	0.131	0.7552			
		$q_i = 0.1$	3.10631e-4	3.106E-4	6.433E-4			
		$q_i = 0.01$	5.99831e-11	5.998E-11	6.435E-11			
		$q_i = 0.001$	6.39009e-18	6.390E-18	6.435E-18			
$q_i = 0.0001$		6.43050e-25	6.430E-25	6.435E-25				
$q_i = 0.00001$	6.43455e-32	6.4345E-32	6.435E-32					
<p>Пример 2. Расчет надежности невозстанавливаемого звена с резервированием замещением и с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.</p> <p>$T_{oi} = 12\ 500$ час., $t = 13\ 140$ час.</p> <p>Параметр $0\% \leq \alpha \leq 100\%$ определяет степень нагруженности резерва.</p>	$T_{oi} = 12\ 500$ час	$\alpha = 100$	$P_c(13140)$ T_{oi} (час)	0.436164 13541.7	0.43616353 13541.667	0.2759 не вычисляется		
		$\alpha = 50$	$P_c(13140)$ T_{oi} (час)	0.526078 15416.7	не вычисляется	не вычисляется		
			$\alpha = 20$	$P_c(13140)$ T_{oi} (час)			0.595357 17140.1	
			$\alpha = 0$	$P_c(13140)$ T_{oi} (час)			0.648983 18750	
	$T_{oi} = 1250000$ час	$\alpha = 100$	$Q_c(13140)$	4.538e-6	4.538E-6	4.587E-6		
			T_{oi} (час)	1354166.7	1354166.667	не вычисляется		
	<p>Пример 3. Расчет невозстанавливаемого звена со скользящим резервированием с заданной интенсивностью отказов элементов в предположении экспоненциального распределения</p>	$\lambda = 10^{-4}$ 1/ч $t = 8760$ ч.	$\alpha = 100$	$P_c(8760)$ T_{oi} (час)	0.375835 8333.3	0.375835 8333.3	в ПК Risk Spectrum вычисляются, но результаты не приведены	
				$\alpha = 20$	$P_c(8760)$ T_{oi} (час)	0.452762 9547.8	не вычисляется не вычисляется	не вычисляется не вычисляется
			$\lambda = 10^{-4}$ 1/ч $t = .10000$ ч	$\alpha = 100$	$P_c(10000)$ T_{oi} (час)	0.3064 8333.3	0.3064317 8333.3	0.7835 не вычисляется
					Значимость элементов	не вычисляется	0.4651	0.632
$\lambda = 10^{-6}$ 1/ч $t = .10000$ ч		$\alpha = 20$	$P_c(10000)$ T_{oi} (час)	0.3813 9547	не вычисляется не вычисляется	не вычисляется не вычисляется		
			$Q_c(10000)$ T_{oi} (час)	2.95e-4 833333	2.95047E-4 833338.8	2.97E-4 не вычисляется		
		$\alpha = 100$	Значимость элементов	не вычисляется	1.97E-2	9.95E-3		
			$Q_c(10000)$ T_{oi} (час)	2.17e-4 954534	не вычисляется не вычисляется	не вычисляется не вычисляется		
<p>Пример 4. Автоматическое определение списка минимальных путей звена со скользящим резервированием</p>		Количество КПУФ	Логические модели совпали			не определяется		
			3	3	3			
		Количество МСО	Логические модели совпали					
			3	3	3			

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.2

Выводы специалистов ИПУ РАН

Основной целью данного раздела являлась проверка возможности (и точности) решения комбинаторных задач "K/N" высокой размерности и решение задач с облегченным резервом.

На ПК Relex и ПК АСМ успешно решены комбинаторные задачи "K/N", на ПК Risk Spectrum эти задачи решены лишь при не очень высокой размерности и с погрешностью, увеличивающейся с уменьшением надежности элементов (базисных событий).

Модели с облегченным резервом решены только на ПК Relex.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. В настоящее время в СФЦ ПК АСМ непосредственно не реализован логический оператор "K/N", широко использующийся в ПК Relex и Risk Spectrum. Долгое время мы обходились универсальной возможностью непосредственного структурного описания средствами СФЦ комбинаторных (мажоритарных) логических отношений небольшой размерности (до $N=12$). При дальнейшем увеличении N в ПК АСМ наблюдается экспоненциальный рост временных затрат на автоматическое решение соответствующих систем логических уравнений и определение логических ФРС [10, 11]. Очень громоздкими становятся и соответствующие СФЦ исследуемых систем. Поэтому, после тщательной теоретической проработки были созданы две специальные утилиты моделирования и анализа головных однородных и неоднородных комбинаторных подсистем большой размерности, которые были использованы в настоящем исследовании. Для комбинаторного анализа монотонных структур эти утилиты достаточно просты. Значительно сложнее оказалось учесть немонотонность исследуемых систем, что было необходимо для сохранения логической полноты и универсальности технологии и ПК АСМ. Эту задачу удалось успешно решить. В настоящее время планируются работы по внедрению средств высокоразмерного комбинаторного анализа в следующие версии ПК АСМ СЗМА. Настоящая НИР помогла подтвердить корректность всех выполненных предварительных разработок.
2. Результаты решения всех высокоразмерных комбинаторных задач с помощью ПК Relex и утилитами технологии АСМ полностью совпали (см. Пример 1 данного раздела).
3. Результаты решения задачи $K/N=7/15$, полученные с помощью ПК Risk Spectrum, хорошо согласуются с результатами, полученными в технологии АСМ, но только в случаях, когда собственные вероятности отказа элементов меньше 0.01 (см. Пример 1). В других случаях расхождения достигают значительных величин (см. Примеры 1-3).
4. В настоящее время технология и ПК АСМ реализуют только методы расчета показателей надежности невосстанавливаемых систем со степенью нагруженности резерва $\alpha = 100$. Для всех указанных случаев расчеты показателей надежности, выполненные ПК Relex и ПК АСМ полностью совпали (см. Примеры 2 и 3). В Компании планируются разработки программных модулей учета степени нагруженности резерва и их внедрение в ПК АСМ СЗМА.
5. Решение сопоставимых задач данного класса с помощью ПК АСМ и ПК Risk Spectrum показало определенное расхождение результатов. По нашему мнению это

обусловлено реализацией в ПК Risk Spectrum приближенных методов расчета показателей надежности систем.

6. Логические ФРС, полученные ПК АСМ и представляющие КПУФ, совпали с логическими моделями, полученными ПК Relex. Логические модели представляющие МСО совпали у всех трех программных комплексов.

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Все три программных комплекса позволяют производить моделирование и расчет показателей надежности мажоритарных систем. В кодах Relex и Risk Spectrum данная возможность реализована путем использования в графической модели специального логического оператора «К/Ν». В коде АСМ данная возможность реализуется либо путем непосредственного изображения на графе СФЦ условий мажоритарности, либо путем использования специальных утилит.

Коды Relex и АСМ обеспечивают расчеты надежности систем со значительно большей степенью мажоритарности, чем код Risk Spectrum (не более 9 из N).

2. Все три кода позволяют рассчитывать надежность систем с резервированием замещением и со скользящим резервированием, однако только ПК Relex позволяет учитывать степень нагруженности резерва.

3. Результаты решения данной задачи подтвердили вывод, полученный при решении предыдущей задачи – результаты решения с помощью кода Risk Spectrum начинают приближаться к истинным значениям показателей надежности системы только при высокой собственной надежности элементов системы.

2.3. Расчет надежности фрагмента ядерной энергетической установки

2.3.1. Описание задачи

На рис.2.3.1 представлена функциональная схема фрагмента ядерной энергетической установки (ЯЭУ), состоящей из следующих основных элементов и подсистем:

- системы поддержания вакуума в секциях главного конденсатора (1);
- 2-х секций главного конденсатора левого и правого каналов (2, 3);
- 2-х конденсатных насосов левого и правого каналов (5, 6);
- переключки между каналами (4);
- 2-х питательных насосов левого и правого каналов (9, 10);
- 2-х блоков питательных клапанов левого и правого каналов (11, 12);
- 4-х парогенераторов левого и правого каналов (13, 14, 15, 16);
- одного турбогенератора (23).

Наличие переключки позволяет обеспечить работу конденсатного насоса одного канала на питательный насос другого канала.

Задача состоит в необходимости нахождения вероятности безотказной работы ЯЭУ при условии, что для обеспечения нормального функционирования турбогенератора достаточным является нахождение в работе любых двух (из четырех) парогенераторов.

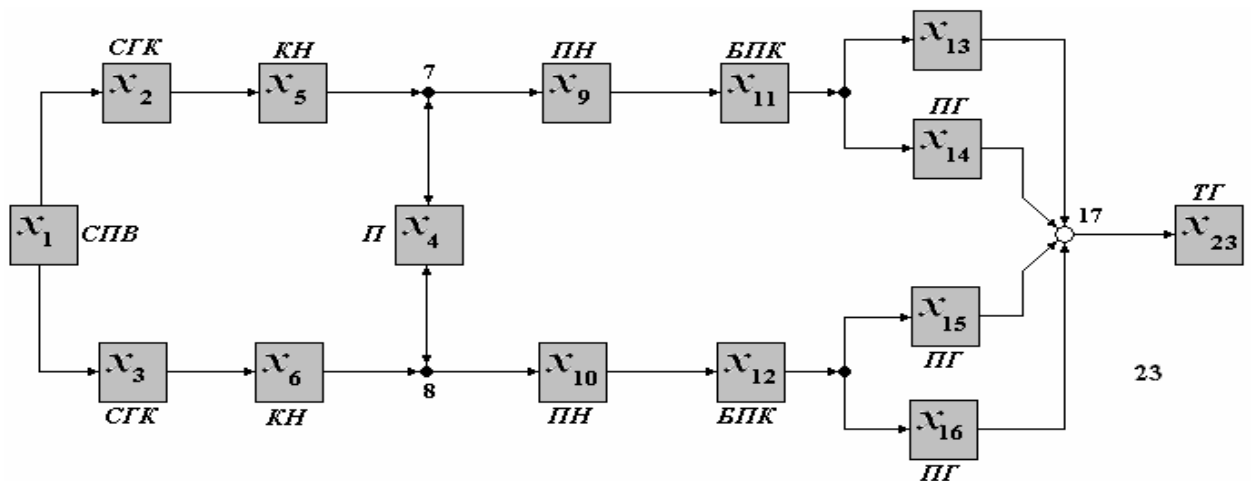


Рис.2.3.1. Функциональная схема ЯЭУ

2.3.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

На рис. 2.3.2. приведена блок-схема данной ЯЭУ, построенная средствами графического редактора ПК Relex RBD.

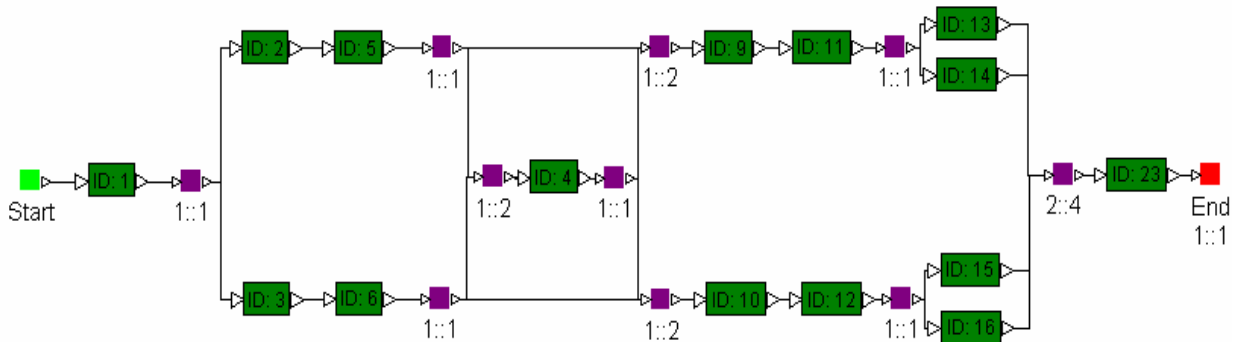


Рис. 2.3.2. Блок-схема для автоматизированного моделирования и расчета надежности ЯЭУ в Relex RBD

Пример 1. Расчет надежности ЯЭУ по заданным вероятностям безотказной работы элементов, независимым от времени.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1.

Вероятность безотказной работы	
элементов	системы
$P_i = 0.7 (i = 1 \div 23)$	0.152035
$P_i = 0.999 (i = 1 \div 23)$	0.997985

Пример 2. Расчет восстанавливаемой системы с заданными средними наработками до отказа и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.3.2.

Таблица 2.3.2.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 17520ч)	Коэффициент готовности системы в точке 17520ч	Параметр потока отказов в точке 17520ч	Hazard Rate (величина обратная средней наработке между отказами)	Среднее время между отказами (MTBF)
$T_i = 2628 \text{ ч}$ (0.3 года) (i=2÷6, 9÷16) $T_i = 8760 \text{ ч}$ (10 лет) (i = 1, 23)	$T_{vi} = 500 \text{ ч}$ (i=1÷23)	I. Восстановление начинается после отказов элементов				
		$3e-11$	0.689456	$9.54e-4$	$13.83e-4$	1048.5
		II. Восстановление начинается после отказа системы				
			0.414106	$6.54e-4$	$15.78e-4$	1790

Для случая I: среднее время восстановления системы может быть получено как MTBF - $1/\text{Hazard Rate} = 325.6$ ч. Для вероятности безотказной работы (это вероятность восстанавливаемой системы до первого отказа) вычисляется нижняя оценка. Средняя наработка между отказами может быть получена как обратная величина к Hazard Rate (на стационарном участке). $T_{\text{между}} = 722.9$ ч.

Пример 3. Список минимальных путей

Список минимальных путей приведен на рис. 2.3.3. Рисунок получен копированием экрана таблицы минимальных путей Relx RBD

Path Sets												
1	ID: 11	ID: 5	ID: 2	ID: 13	ID: 14	ID: 23	ID: 9	ID: 1				
2	ID: 11	ID: 6	ID: 3	ID: 13	ID: 14	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 1			
3	ID: 12	ID: 11	ID: 5	ID: 2	ID: 13	ID: 15	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 10	ID: 1	
4	ID: 12	ID: 11	ID: 6	ID: 5	ID: 2	ID: 3	ID: 13	ID: 15	ID: 23	ID: 9	ID: 10	ID: 1
5	ID: 12	ID: 11	ID: 6	ID: 3	ID: 13	ID: 15	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 10	ID: 1	
6	ID: 12	ID: 11	ID: 5	ID: 2	ID: 14	ID: 15	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 10	ID: 1	
7	ID: 12	ID: 11	ID: 6	ID: 5	ID: 2	ID: 3	ID: 14	ID: 15	ID: 23	ID: 9	ID: 10	ID: 1
8	ID: 12	ID: 11	ID: 6	ID: 3	ID: 14	ID: 15	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 10	ID: 1	
9	ID: 12	ID: 11	ID: 5	ID: 2	ID: 13	ID: 16	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 10	ID: 1	
10	ID: 12	ID: 11	ID: 6	ID: 5	ID: 2	ID: 3	ID: 13	ID: 16	ID: 23	ID: 9	ID: 10	ID: 1
11	ID: 12	ID: 11	ID: 6	ID: 3	ID: 13	ID: 16	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 10	ID: 1	
12	ID: 12	ID: 11	ID: 5	ID: 2	ID: 14	ID: 16	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 10	ID: 1	
13	ID: 12	ID: 11	ID: 6	ID: 5	ID: 2	ID: 3	ID: 14	ID: 16	ID: 23	ID: 9	ID: 10	ID: 1
14	ID: 12	ID: 11	ID: 6	ID: 3	ID: 14	ID: 16	ID: 23	ID: 4	ID: 9	ID: 10	ID: 1	
15	ID: 12	ID: 5	ID: 2	ID: 15	ID: 16	ID: 23	ID: 4	ID: 10	ID: 1			
16	ID: 12	ID: 6	ID: 3	ID: 15	ID: 16	ID: 23	ID: 10	ID: 1				

Рис. 2.3.3. Список минимальных путей функционирования ЯЭУ

Пример 4. Список минимальных сечений отказов

Список минимальных путей приведен на рис. 2.3.4. Рисунок получен копированием экрана таблицы минимальных сечений Relx RBD

Cut Sets			
1	ID: 12	ID: 11	
2	ID: 6	ID: 5	
3	ID: 6	ID: 2	
4	ID: 12	ID: 13	
5	ID: 12	ID: 14	
6	ID: 12	ID: 9	
7	ID: 5	ID: 3	
8	ID: 2	ID: 3	
9	ID: 14	ID: 10	
10	ID: 13	ID: 10	
11	ID: 11	ID: 15	
12	ID: 15	ID: 9	
13	ID: 11	ID: 16	
14	ID: 16	ID: 9	
15	ID: 11	ID: 10	
16	ID: 9	ID: 10	
17	ID: 23		
18	ID: 1		
19	ID: 12	ID: 5	ID: 4
20	ID: 12	ID: 2	ID: 4
21	ID: 14	ID: 15	ID: 16
22	ID: 13	ID: 15	ID: 16
23	ID: 13	ID: 14	ID: 15
24	ID: 6	ID: 14	ID: 4
25	ID: 6	ID: 13	ID: 4
26	ID: 13	ID: 14	ID: 16
27	ID: 11	ID: 6	ID: 4
28	ID: 6	ID: 4	ID: 9
29	ID: 3	ID: 14	ID: 4
30	ID: 3	ID: 13	ID: 4
31	ID: 11	ID: 3	ID: 4
32	ID: 3	ID: 4	ID: 9
33	ID: 5	ID: 15	ID: 4
34	ID: 2	ID: 15	ID: 4
35	ID: 5	ID: 16	ID: 4
36	ID: 2	ID: 16	ID: 4
37	ID: 5	ID: 4	ID: 10
38	ID: 2	ID: 4	ID: 10

Рис. 2.3.4. Список минимальных сечений отказов ЯЭУ

2.3.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

СФЦ ЯЭУ, необходимая для применения технологии АСМ, изображена на рис.2.3.5.

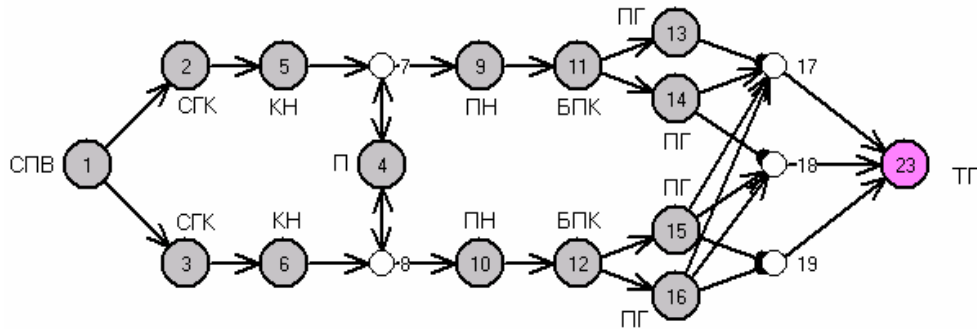


Рис.2.3.5. СФЦ для автоматизированного моделирования и расчета надежности ЯЭУ

Как видим, эта СФЦ подобна исходной функциональной схеме ЯЭУ, приведенной на рис.2.3.1, поэтому ее построение не вызывает затруднений.

Пример 1. Расчет надежности ЯЭУ по заданным вероятностям безотказной работы элементов, независимым от времени

Выполненные с помощью ПК АСМ СЗМА моделирование и расчет вероятности безотказной работы ЯЭУ, при заданных $p_i = 0.7$, дали следующие результаты:

1. Количество КПУФ - 16;
2. Количество одночленов точного многочлена ВФ – 26;
3. Вероятность безотказной работы системы - **0.152035396543**.

Вычисленное значение вероятности безотказной работы практически совпало с результатом, полученным с помощью модуля Relex RBD.

С помощью ПК Risk Spectrum в прямой постановке решение данного примера не рассмотрено. Однако, в табл.2.3.4 приведено решение обратной задачи, согласно которой значение вероятности отказа ЯЭУ, при всех $q_i = 1 - p_i = 1 - 0.7 = 0.3$, составило **0.087**. Это означает, что в пересчете вероятность безотказной работы ЯЭУ (согласно ПК Risk Spectrum) характеризуется величиной

$$1 - 0.087 = \mathbf{0.913}$$

Это **в шесть раз** больше, чем значение вероятности безотказной работы ЯЭУ, вычисленное ПК АСМ и модулем Relex RBD (**0.152035396543**).

Второе решение данного примера, приведенное в табл.2.3.4, определяет вероятность **0.002015** отказа ЯЭУ, вычисленную с помощью ПК Risk Spectrum при значениях вероятностей отказов всех элементов $q_i = 1 - p_i = 1 - 0.999 = 0.001$. Аналогичные расчеты, выполненные на всех ПК, реализующих технологию АСМ, дали практически такой же результат - **0.0020149558**. Это еще раз подтверждает, что ПК Risk Spectrum корректно вычисляет вероятности отказа систем при $q_i \leq 0.001$, что указано в технической документации на этот комплекс.

Пример 2. Расчет восстанавливаемой ЯЭУ с заданными средними наработками до отказа и средним временем восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения

Для решения используется та же СФЦ ЯЭУ, приведенная на рис.2.3.5. В этом примере ЯЭУ рассматривается как восстанавливаемая система со следующими параметрами элементов:

- средняя наработка до отказа элементов $i = 2 - 6, 9 - 16$ составляет $T_{Oi} = 0.3$ г;
- средняя наработка до отказа элементов $i = 1, 23$ составляет $T_{Oi} = 10$ лет;
- среднее время восстановления всех элементов $T_{Bi} = 500$ час;
- наработка системы $t = 17520$ час (2 года).

На рисунке 2.3.6 изображена экранная форма окна результатов решения этой задачи, с помощью ПК АСМ СЗМА

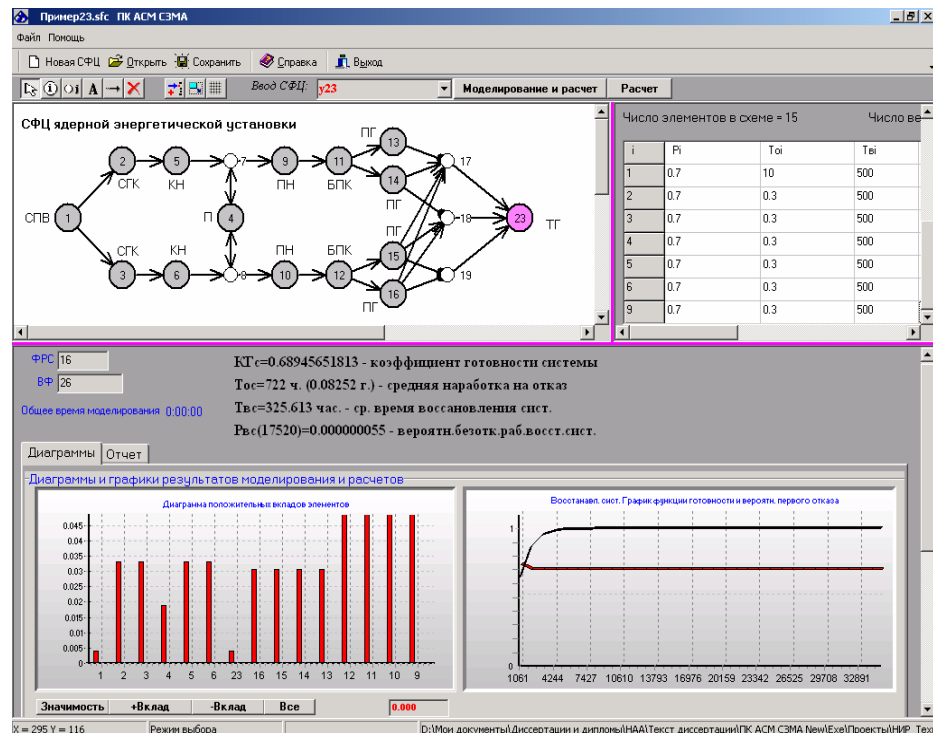


Рис. 2.3.6. Результаты расчетов надежности восстанавливаемой ЯЭУ

В таблице 2.3.3 приведены основные числовые характеристики надежности рассматриваемой АЭУ.

Таблица 2.3.3.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	ВБР системы на интервале (0 ÷ 17520ч)	Коэффициент готовности системы	Среднее время восстановления системы	Частота отказов системы (1/год)	Средняя наработка на отказ (час)
$T_i = 2628$ ч (0.3г.) ($i=2+6, 9+16$) $T_i=10$ лет ($i=1, 3$)	$T_{vi}=500$ ч ($i=1+18$)	0.000000055	0.6894565181	325.612857	8.354587	722

Полученное в ПК АСМ СЗМА расчетное значение коэффициента готовности **0.689456518134** практически совпало со значением этого показателя, полученного с по-

мощью модуля Relex RBD для случая, когда восстановление начинается после отказов элементов (см. табл.2.3.2).

Средняя наработка на отказ ЯЭУ, вычисляется в ПК АСМ СЗМА приближенными методами, и составляют: $T_{OC} = 722$ час, а среднее время восстановления ЯЭУ $T_{BC} = 325.61$ час. В расчетах Relex RBD приведено значение среднего времени между отказами $MTBF=1048.5$ час. Нетрудно видеть, что эта величина, практически, является суммой вычисленных ПК АСМ СЗМА показателей $T_{OC} + T_{BC} = 722 + 325.61 = 1047.61$ час. Поэтому, указанные временные характеристики надежности, вычисляемые ПК АСМ и Relex RBD, также можно считать вполне согласованными.

Оценка вероятности безотказной работы восстанавливаемой ЯЭУ, вычисляемая в ПК АСМ СЗМА, составила

$$P_{BC}(17520) \approx \exp\{-1/(T_{OC} + T_{BC})\} \approx 0.000000055 = 5.46e - 8,$$

что существенно отличается от аналогичного показателя, вычисляемого Relex RBD, и равного $P_{BC}(17520) = 3e - 11$, (см. табл.2.3.2). Это расхождение обусловлено тем, что в ПК АСМ при расчетах данной характеристики учитывается значение T_{BC} , которое в данном примере равно 500 час и сопоставимо с $T_{OC} = 722$ час. Вероятно, в модуле Relex RBD расчеты данной характеристики выполняются без учета времени восстановления всей системы. Тогда получаем:

$$P_{BC}(17520) \approx \exp\{-1/(T_{OC})\} = 2.89e - 11 \approx 3e - 11$$

что совпадает с результатом расчета модуле Relex RBD. Поэтому вычисления показателя $P_{BC}(t)$ в ПК АСМ и Relex RBD также можно считать вполне согласованными.

Непосредственный расчет показателей "Параметр потока отказов" и "Hazard Rate" в ПК АСМ в настоящее время не предусмотрен, хотя их реализация не представляет большой сложности.

В настоящее время в ПК АСМ не реализованы методы расчета показателей надежности систем, восстановление которых начинается после отказа всей системы.

Результаты решения данного примера с помощью ПК Risk Spectrum приведены в табл.2.3.5. Вычислен только показатель «коэффициент неготовности системы», который составил **0.322**. Следовательно, в пересчете коэффициент готовности ЯЭУ, в данном случае, оценивается величиной $1 - 0.322 = 0.678$, что достаточно близко к значению **0.6894565181**, полученному модулем Relex RBD и ПК АСМ СЗМА для случая неограниченного восстановления сразу после отказов элементов.

Пример 3. Список минимальных путей

Список КПУФ ЯЭУ автоматически формируется в ПК АСМ на основе СФЦ, изображенной на рис.2.3.5 и прямого логического критерия $Y_{ЯЭУ} = Y_C = y_{23}$. Он включает следующие 16 конъюнкций:

$$Y_C = \left| \begin{array}{l} x_1 x_2 x_5 x_{23} x_{14} x_{13} x_{11} x_9 \\ x_1 x_3 x_4 x_6 x_{23} x_{14} x_{13} x_{11} x_9 \\ x_1 x_2 x_3 x_5 x_6 x_{23} x_{15} x_{13} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_3 x_4 x_6 x_{23} x_{15} x_{13} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_2 x_4 x_5 x_{23} x_{15} x_{13} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_2 x_3 x_5 x_6 x_{23} x_{16} x_{13} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_3 x_4 x_6 x_{23} x_{16} x_{13} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_2 x_4 x_5 x_{23} x_{16} x_{13} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \end{array} \right| \vee \left| \begin{array}{l} x_1 x_2 x_3 x_5 x_6 x_{23} x_{15} x_{14} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_3 x_4 x_6 x_{23} x_{15} x_{14} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_2 x_4 x_5 x_{23} x_{15} x_{14} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_2 x_3 x_5 x_6 x_{23} x_{16} x_{14} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_3 x_4 x_6 x_{23} x_{16} x_{14} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_2 x_4 x_5 x_{23} x_{16} x_{14} x_{12} x_{11} x_{10} x_9 \\ x_1 x_3 x_6 x_{23} x_{16} x_{15} x_{12} x_{10} \\ x_1 x_2 x_4 x_5 x_{23} x_{16} x_{15} x_{12} x_{10} \end{array} \right|$$

Этот результат точно совпадает со списком минимальных путей, полученных с помощью модуля Relex RBD (см. рис.2.3.3).

Решение этого примера с помощью ПК Risk Spectrum не приведено.

Пример 4. Список минимальных сечений отказов

Список МСО ЯЭУ автоматически формируется в ПК АСМ на основе СФЦ, изображенной на рис.2.3.5 и обратного логического критерия $\bar{Y}_{ЯЭУ} = \bar{Y}_C = \bar{y}23 = y''23$. Он включает следующие 38 конъюнкций:

$$Y_C = \left| \begin{array}{l} x''2 \ x''4 \ x''16 \\ x''4 \ x''5 \ x''16 \\ x''16 \ x''9 \\ x''16 \ x''11 \\ x''16 \ x''14 \ x''13 \\ x''1 \\ x''2 \ x''3 \\ x''2 \ x''6 \\ x''3 \ x''5 \\ x''5 \ x''6 \\ x''3 \ x''4 \ x''13 \\ x''3 \ x''4 \ x''9 \\ x''3 \ x''4 \ x''11 \\ x''3 \ x''4 \ x''14 \\ x''4 \ x''6 \ x''13 \\ x''4 \ x''6 \ x''9 \\ x''4 \ x''6 \ x''11 \\ x''4 \ x''6 \ x''14 \\ x''13 \ x''10 \end{array} \right. \vee \left| \begin{array}{l} x''2 \ x''4 \ x''10 \\ x''4 \ x''5 \ x''10 \\ x''10 \ x''9 \\ x''11 \ x''10 \\ x''14 \ x''10 \\ x''13 \ x''12 \\ x''2 \ x''4 \ x''12 \\ x''4 \ x''5 \ x''12 \\ x''12 \ x''9 \\ x''12 \ x''11 \\ x''14 \ x''12 \\ x''2 \ x''4 \ x''15 \\ x''4 \ x''5 \ x''15 \\ x''15 \ x''9 \\ x''15 \ x''11 \\ x''15 \ x''14 \ x''13 \\ x''16 \ x''15 \ x''13 \\ x''16 \ x''15 \ x''14 \\ x''23 \end{array} \right.$$

Этот результат точно совпадает со списками минимальных сечений, полученных с помощью модуля Relex RBD (см. рис.2.3.4) и ПК Risk Spectrum (см. табл.2.3.6).

2.3.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

Пример 1. Расчет надежности ЯЭУ по заданным вероятностям безотказной работы элементов, независящим от времени

Дерево отказов ЯЭУ представлено на рис. 2.3.7. Результаты расчетов представлены в таблице 2.3.4.

Таблица 2.3.4.

Вероятность отказа	
элементов	системы
$Q_i = 0.3 (i = 1 \div 23)$	0.087
$Q_i = 0.001 (i = 1 \div 23)$	0.002015

Второй результат (при $Q_i = 0.001$) полностью совпал с результатами, полученными с помощью ПК АСМ при тех же значениях вероятности отказов элементов ЯЭУ.

Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой ЯЭУ с заданными средними наработками до отказа и средним временем восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения

В данном примере ЯЭУ рассматривается как восстанавливаемая система с параметрами элементов:

- средняя наработка до отказа элементов $i = 2 - 6, 9 - 16$ составляет $T_{O_i} = 0.3$ г;
- средняя наработка до отказа элементов $i = 1, 2, 3$ составляет $T_{O_i} = 10$ лет;
- среднее время восстановления всех элементов $T_{B_i} = 500$ час;
- наработка системы $t = 17520$ час (2 года).

Результаты расчетов представлены в таблице 2.3.5.

Таблица 2.3.5.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Коэффициент неготовности системы
$T_i = 2628$ часов ($i=2 \div 6, 9 \div 16$) $T_i=87600$ часов ($i=1, 2, 3$)	$T_{B_i}=500$ ч ($i=1 \div 18$)	0.322

Поскольку значения собственных характеристик надежности элементов ЯЭУ приняты достаточно низкими, то результаты расчетов с помощью ПК Risk Spectrum не совпали с результатами расчетов по другим кодам.

Пример 3. Список минимальных путей

В технологии Risk Spectrum построение списка минимальных путей не используется.

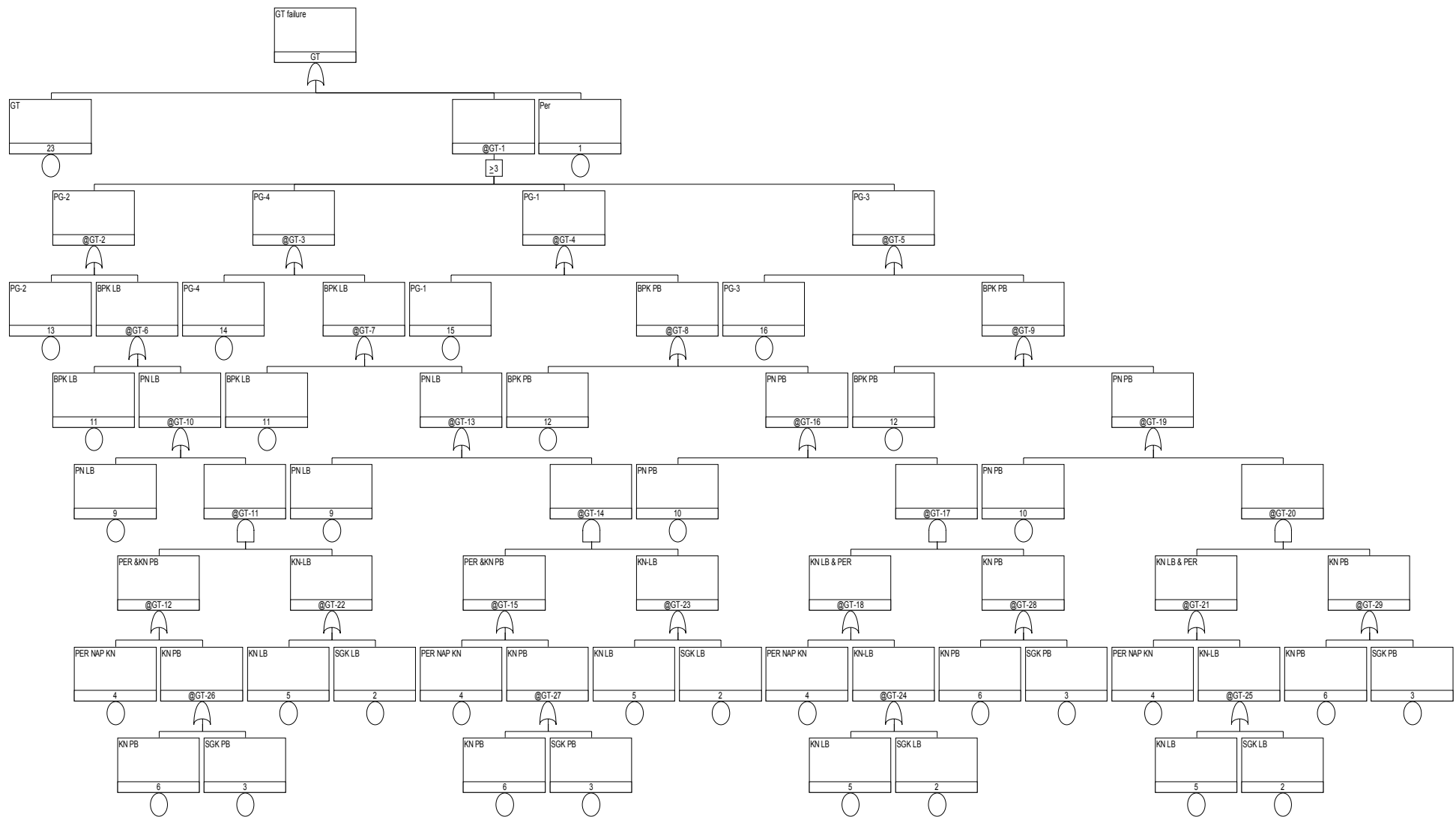


Рис. 2.3.7. Дерево отказов ЯЭУ

Пример 4. Список минимальных сечений отказов

Список минимальных сечений отказов ЯЭУ, полученный с помощью кода Risk Spectrum приведен в таблице 2.3.6.

Таблица 2.3.6.

№№ сечений	Абсолютный вклад в величину отказа системы	Вклад в величину отказа системы, %	Номера элементов, входящих в сечение		
1	3,00E-01	32,86	1		
2	3,00E-01	32,86	23		
3	9,00E-02	9,86	12	14	
4	9,00E-02	9,86	16	9	
5	9,00E-02	9,86	10	11	
6	9,00E-02	9,86	3	5	
7	9,00E-02	9,86	10	13	
8	9,00E-02	9,86	11	16	
9	9,00E-02	9,86	12	13	
10	9,00E-02	9,86	11	15	
11	9,00E-02	9,86	2	6	
12	9,00E-02	9,86	5	6	
13	9,00E-02	9,86	11	12	
14	9,00E-02	9,86	12	9	
15	9,00E-02	9,86	2	3	
16	9,00E-02	9,86	15	9	
17	9,00E-02	9,86	10	14	
18	9,00E-02	9,86	10	9	
19	2,70E-02	2,96	3	4	9
20	2,70E-02	2,96	12	4	5
21	2,70E-02	2,96	16	2	4
22	2,70E-02	2,96	10	4	5
23	2,70E-02	2,96	12	2	4
24	2,70E-02	2,96	14	4	6
25	2,70E-02	2,96	13	14	15
26	2,70E-02	2,96	10	2	4
27	2,70E-02	2,96	14	3	4
28	2,70E-02	2,96	13	4	6
29	2,70E-02	2,96	15	4	5
30	2,70E-02	2,96	13	15	16
31	2,70E-02	2,96	13	3	4
32	2,70E-02	2,96	11	4	6
33	2,70E-02	2,96	15	2	4
34	2,70E-02	2,96	11	3	4
35	2,70E-02	2,96	4	6	9
36	2,70E-02	2,96	16	4	5
37	2,70E-02	2,96	14	15	16
38	2,70E-02	2,96	13	14	16

Как следует из таблицы 2.3.6 список МСО в точности совпадает со списками МСО, полученными с помощью других ПК.

Сводная таблица результатов раздела 2.3. " Расчет надежности фрагмента ядерной энергетической установки "					
Примеры	Параметры и характеристики задач	Результаты моделирования и расчетов			
		Relax	ПК АСМ	Risk Spectrum	
1	2	3	4	5	
Пример 1. Расчет надежности ЯЭУ по заданным вероятностям безотказной работы элементов, независимым от времени ($p_i = 0.7$, $p_i = 0.999$)	$p_i = 0.7$	0.152035	0.1520353965	0.913	
	$p_i = 0.999$	0.997985	0.9979850442	0.997985	
Пример 2. Расчет восстанавливаемой системы ЯЭУ с заданными средними наработками до отказа и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения. $T_{oi}=0.3$ г., $i = 2-6, 9-16$ $T_{oi}=10$ лет, $i = 1, 23$ $T_{vi} = 500$ час., $t = 17520$ час,	восстановление начинается после отказа элемента	Вер. безот. раб. ЯЭУ	3e-11	3.0E-11	не вычисляется
		Коэффициент готовн.	0.689456	0.6894565181	0.678 <i>0.984 / 0.602 ??</i>
		Парам. потока отказов	9.54e-4	не вычисляется	не вычисляются
		Hazard Rate	13.83e-4	13.85E-4	
		Среднее время между отказами (MTBF)	1048.5	1047.61	
		Среднее время восст. системы (час).	325.6	325.612857	
	восстановление начинается после отказа системы	Средняя наработка на отказ системы (час)	722.9	722	не вычисляются
		Вер.безот. раб. ЯЭУ		не вычисляются	
		Коэффициент готовности	0.414106		
		Парам. потока отказов	6.54e-4		
Hazard Rate	15.78e-4	не вычисляются	не вычисляются		
Среднее время между отказами (MTBF) (час)	1790				
Пример 3. Автоматическое определение списка минимальных путей ЯЭУ	Количество КПУФ	<i>Логические модели совпали</i>		не определяется	
		16	16		
Пример 4. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов ЯЭУ	Количество МСО	<i>Логические модели совпали</i>		38	
		38	38		

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.3

Выводы специалистов ИПУ РАН

В данном разделе, так же как и в разделе 2.1, проверялась точность решения классической логико-вероятностной модели системы (но более простой, по сравнению с системой раздела 2.1) и возможность оценки показателей, непосредственно не вычисляемых в логико-вероятностных моделях. Дополнительно, проверялась возможность учета в моделях одной из возможных стратегий восстановления – восстановление после отказа системы.

Все три комплекса справились с примерами оценки коэффициента готовности (и получения логических моделей) в классической логико-вероятностной постановке. На ПК Risk Spectrum получены приближенные оценки, точность которых зависит от надежности элементов системы. Приближенные асимптотические оценки других показателей получены только на ПК Relex и ПК АСМ (хотя необходимые формулы для ПК Risk Spectrum приведены в теоретическом разделе). Учет в моделях стратегий восстановления после отказа (а также после останова) системы реализован только в ПК Relex.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Решения этой задачи еще раз подтвердили простоту, удобство и эффективность описание структуры системы графическими средствами СФЦ (см. рис.2.3.5, технология АСМ) и графическими средствами блок-схем (см. рис.2.3.2, технология Relex RBD) в сравнении с графическими средствами деревьев отказов (см. рис.2.3.7). Различия здесь не только во внешнем виде рисунков. Главное заключается в принципиально разных подходах к постановке задач. При построении СФЦ или блок-схемы ЯЭУ разработчик применяет прямой подход к формализованной постановке задачи, т.е. использует знания о том, как исследуемая система правильно, безотказно, безаварийно работает, т.е. при каких логических условиях она реализует свое главное функциональное назначение. Поэтому такие схемы, часто, строить проще, они, как правило, подобны исходным функциональным схемам системы (см. рис.2.3.1), что позволяет разработчику делать меньше ошибок при постановке задачи. При построении дерева отказов разработчик должен применять обратный подход, т.е. использовать знания о том, как система не работает, отказывает, как возникает аварийная ситуация. Фактически, он должен мысленно инверсировать условия работоспособности системы и графически представить в виде дерева все (и не пропустить ни одного!) сечения отказов. Часто это сделать трудно, что наглядно показано в данном примере (см. рис.2.3.7). Аналогичная ситуация имела место в разделе 2.1 настоящей НИР (см. рис.2.1.10).

В дополнение к сказанному отметим, что важной положительной стороной аппарата СФЦ технологии АСМ является возможность его применения как при прямом, так и при обратном подходах к построению структурных моделей надежности, безопасности и риска сложных систем. Т.е. СФЦ позволяют корректно представлять как блок-схемы так и деревья отказов и событий.

2. Как и в предыдущем примере, все результаты вычислений показателей надежности, полученные с помощью ПК АСМ (8 показателей), полностью совпали с соответствующими результатами, полученными с помощью ПК Relex RBD. В настоящее время в ПК АСМ не вычисляются показатели надежности систем, восстановление элементов в которых начинается после отказа системы в целом (см. Примеры 1, 2). В Компании планируются соответствующие доработки ПК АСМ СЗМА.

3. Из трех показателей, вычисленных с помощью ПК Risk Spectrum, с результатами АСМ и Relex совпали два. В Примере 1 значительное отклонение на "завышение" имеет вероятность безотказной работы ЯЭУ, вычисленная с помощью ПК Risk Spectrum (0.913), в сравнении с результатами расчета этого показателя в ПК Relex RBD и ПК АСМ (0.15035). По мнению специалистов СПИК СЗМА данное расхождение является следствием приближенных методов расчетов вероятностных показателей, реализованных в ПК Risk Spectrum, которые нельзя использовать при собственных параметрах надежности элементов больше 0.001.
4. Логическая модель работоспособности ЯЭУ полученная с помощью ПК АСМ совпала с логической моделью работоспособности полученной ПК Relex RBD (см. Пример 3).
5. Логические модели отказов совпали у всех трех программных комплексов (см. Пример 4).

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Все три программных комплекса могут решать задачи данного типа. При условии высокой собственной надежности элементов системы результаты решения с помощью ПК Risk Spectrum близки к точным значениям, вычисляемым с помощью двух других кодов.
2. Блок-схемы надежности, используемые в коде Relex, и СФЦ, используемые в кодах АСМ, значительно менее громоздки, чем деревья отказов, используемые в коде Risk Spectrum.
3. Только код Relex позволяет рассчитывать показатели надежности систем, восстановление которых начинается после отказа системы в целом.

2.4. Расчет надежности мостиковой схемы

2.4.1. Описание задачи

Во многих случаях анализа надежности технических систем их структура может быть представлена в виде последовательно-параллельной схемы, т.е. в виде комбинации участков с последовательным (в смысле надежности) соединением элементов и участков с параллельным (в смысле надежности) соединением элементов.

Последовательным (в смысле надежности) соединением элементов называют такое соединение некоторого множества элементов, для отказа которого (множества) необходимым и достаточным условием является отказ любого одного элемента, входящего в данное множество.

Параллельным (в смысле надежности) соединением элементов называют такое соединение некоторого множества элементов, для отказа которого (множества) необходимым и достаточным условием является одновременный отказ всех элементов, входящих в данное множество.

Методы расчета показателей надежности последовательно-параллельных схем хорошо известны и относительно просты.

Реальные сложные технические системы зачастую не могут быть представлены последовательно-параллельными схемами, например, из-за наличия перемычек (мостиков) между каналами, параллельными участками и т.п. Характерной особенностью мостиковых схем является то, что функции алгебры логики (ФАЛ), с помощью которых записываются условия работоспособности (неработоспособности) системы, являются повторными. Это обстоятельство требует, при переходе от ФВЛ к расчетной вероятностной функции, использования специальных методов преобразования ФАЛ.

Качество преобразования ФАЛ во многом определяет и качество расчетов надежности. Т.о. данная задача имеет целью сравнить исследуемые коды по качеству моделирования и расчета показателей надежности мостиковых схем.

Структура мостиковой схемы представлена на рис.2.4.1

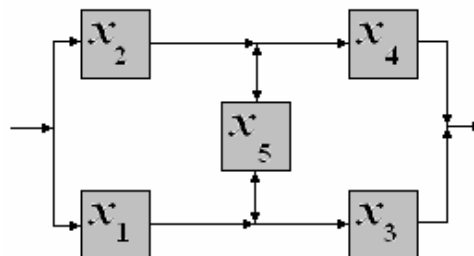


Рис. 2.4.1. Функциональная схема мостиковой системы

Требуется рассчитать показатели надежности этой схемы при различных показателях надежности элементов.

2.4.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Мостиковая блок-схема, набранная в Relex RBD, представлена на рис. 2.4.2.

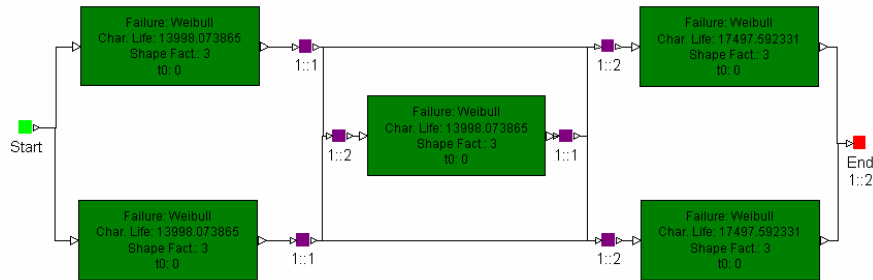


Рис. 2.4.2. Блок-схема для автоматизированного моделирования и расчета надежности мостиковой системы в Relex RBD

Пример 1. Расчет надежности невозстанавливаемой мостиковой системы с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.4.1

Таблица 2.4.1.

Средняя наработка до отказа элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0÷10000)	Средняя наработка до отказа системы (ч)	Интенсивность отказов системы в точке 10000
T _i =12500ч (i =1,2,5) T _i = 15625ч (i = 3,4)	0.473144	11256.6289	120.28e-6

Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.4.2

Таблица 2.4.2.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)	Коэффициент готовности системы в точке 10000ч	Hazard Rate (величина обратная средней наработке между отказами)	Среднее время между отказами (MTBF)
T _i = 12500ч (i = 1,2,5) T _i = 15625ч (i = 3,4)	T _в i =100ч (i = 1 ÷ 5)	0.9793	0.999895784	2.0922706e-6	477999.4

Средняя наработка между отказами может быть получена как обратная величина к Hazard Rate, T_{между}=477949,55ч.

Среднее время восстановления системы может быть получено как

$$MTBF - 1/\text{Hazard Rate} = 49.8\text{ч.}$$

Для вероятности безотказной работы определяется нижняя оценка.

Пример 3. Расчет надежности невозстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов

Плотность распределения Вейбулла задается в следующем виде:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Параметр $\beta=3$, параметр η выбирается для каждого элемента так, чтобы совпадали средние наработки до отказа с экспоненциальным распределением предыдущего расчета.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.4.3

Таблица 2.4.3.

Параметр распределения Вейбулла	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)	Среднее наработка до отказа (MTTF) (ч)
$\eta_i = 13998.073865\text{ч}$ ($i = 1,2,5$)	0.862	13510
$\eta_i = 17497.592331\text{ч}$ ($i = 3,4$)	95% доверительный интервал 0.8624	95% доверительный интервал 13513
	0.8616	13506

Пример 4. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.4.4

Таблица 2.4.4.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)	Коэффициент готовности системы в точке 10000ч	Hazard Rate (величина обратная средней наработке между отказами)	Среднее время между отказами (MTBF)
$\eta_i = 13998.073865\text{ч}$ ($i = 1,2,5$)	$T_{vi} = 100\text{ч}$ ($i = 1 \div 5$)	0.985	0.999908	1.5e-6	481316
$\eta_i = 17497.592331\text{ч}$ ($i = 3,4$)			95% доверительный интервал		95% доверительный интервал
			0.99992		481854
			0.9999		480780

Для вероятности безотказной работы определяется нижняя оценка.

Пример 5. Расчет надежности невозстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов.

Если подобрать распределение Вейбулла по квантилю $P(t)$ в точке $t = 10000$ для невозстанавливаемой системы, чтобы было совпадение $P_i(t)$ для обоих распределений, то получим результаты расчетов, приведенные в таблице 2.4.5

Таблица 2.4.5.

Параметр распределения Вейбулла	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)	Среднее наработка до отказа (MTTF) (ч)
$\eta_i = 10772.17345$ ч. ($i = 1,2,5$) $\eta_i = 11603.972084$ ч. ($i = 3,4$)	0.473144	9875.34

Пример 6. Расчет надежности восстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.4.6

Таблица 2.4.6.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)	Коэффициент готовности системы в точке 10000ч	Hazard Rate (величина обратная средней наработке между отказами)	Среднее время между отказами (MTBF)
$\eta_i = 10772.17345$ ч ($i = 1,2,5$) $\eta_i = 11603.972084$ ч ($i = 3,4$)	$T_{vi} = 100$ ч ($i = 1 \div 5$)	0.982	0.999727	1.8e-6	252104 95% доверительный интервал 252447 251762

Пример 7. Решение задачи “Мостик” с учетом отказов по общей причине в модуле Relex Fault Tree

В модуле Relex Fault Tree реализованы четыре модели отказов по общей причине (CCF):

- Модель Альфа Фактора.
- Модель Бета Фактора.
- MGL Модель (множественных греческих букв)
- BFR Модель (биномиальной интенсивности отказов)

Для сравнения с результатами решения примера 4 расчеты вероятности отказа системы с учетом кратных отказов по общей причине были проведены для мостиковой схемы. Дерево отказов мостиковой системы представлено на рис. 2.4.3.

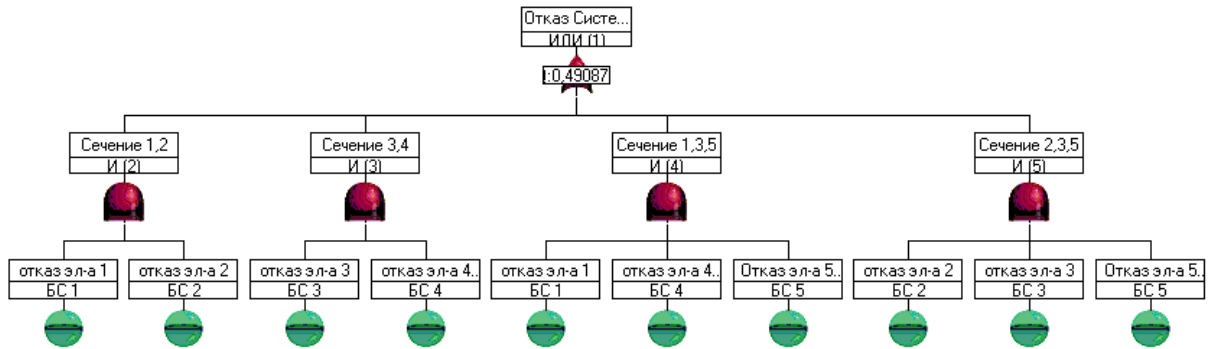


Рис. 2.4.3. Дерево отказов мостиковой системы

Результаты расчетов приведены в таблице 2.4.7

Таблица 2.4.7.

	Вероятность отказа i -го элемента	Условная вероятность возникновения двукратного отказа по общей причине 1 и 2-го элементов (α_2)	Вероятность отказа системы
без учета CCF	0.5 ($i=1 \div 5$)	—	0.5
с учетом CCF	0.5 ($i=3 \div 5$) 0.452381 ($i=1 \div 2$)	0.05	0.490876
без учета CCF	0.00001 ($i=1 \div 5$)		2.0e-10
с учетом CCF	0.00001 ($i=3 \div 5$) 9.406e-6 ($i=1 \div 2$)	0.05	9.5258e-7

Приведем точное выражение для вероятности безотказной работы “мостика” (без учета общей причины)

$$P = p_5(1-q_1q_2)(1-q_3q_4) + q_5(1-(1-p_1p_3)(1-p_2p_4))$$

Результаты расчета по точному формульному выражению дают $P=0.5$.

Проведем расчет с учетом модели α фактора общих причин отказов.

Пусть элементы 1 и 2 “мостика” могут отказывать по общей причине, причем условная вероятность двукратного отказа $\alpha_2 = 0,05$ ($\alpha_1 = 1 - \alpha_2 = 0,95$). Тогда вероятность однократного отказа любого одного из элементов 1,2 равна (q – вероятность отказа элемента в группе)

$$Q_1 = \frac{2 \cdot \alpha_1}{2 \cdot (\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2)} \cdot q = 0,452381,$$

а вероятность одновременного двукратного отказа -

$$Q_2 = \frac{2 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2} \cdot q = 0,047619.$$

Выражение для вероятности отказа “мостика” имеет вид

$$Q_{\text{мост}} = Q_2 + (1 - Q_2) \cdot [q_5 \cdot (1 - (1 - q_1) \cdot (1 - q_3)) \cdot (1 - (1 - q_2) \cdot (1 - q_4)) + (1 - q_5) \cdot (1 - (1 - q_1 \cdot q_2) \cdot (1 - q_3 \cdot q_4))],$$

где $q_1 = q_2 = Q_1$ $q_3 = q_4 = q_5 = 0,5$, и при подстановке данных получаем $Q_{\text{мост}} = 0,490876$.

Если бы не учитывались общие причины отказа элементов 1 и 2, а их вероятности отказа были бы равны не 0,5, а Q_1 , то $Q_{\text{мост}} = 0,465419$, т.е. меньше, чем с учетом общих причин (что и соответствует здравому смыслу). То есть, в модели Альфа Фактора предполагается, что в задаваемую вероятность отказа каждого из элементов группы (в данном примере это $q_1 = q_2 = 0,5$) входит составляющая кратного отказа по общей причине. После вычисления вероятностей однократных (Q_1) и двукратных (Q_2) отказов никакого нарушения здравого смысла не произойдет, если исходить из вычисленной вероятности однократных отказов.

Отметим, что на практике требуется достаточно серьезное обоснование применения той или иной модели общих причин. Так, модель β фактора при $\beta = 0,05$ даст иной результат, а именно $Q_{\text{мост}} = 0,494523$. По мнению представителей ИПУ достаточно обоснованной с практической точки зрения является биномиальная модель, основывающаяся на вероятностях возникновения стрессов и условных вероятностях кратных отказов при стрессах.

Примеры 8 и 9 решались по дереву отказов на рис. 2.4.3 (естественно исключив общие причины отказов) и по дереву успехов (которое приводить не будем) аналогичному дереву отказов на рис. 2.4.3 (естественно изменив номера элементов и задавая вероятности безотказной работы элементов). Ответы приведены в сводной таблице раздела.

2.4.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

Для решения данного примера методами и средствами технологии АСМ был подготовлен следующий вариант СФЦ мостиковой системы

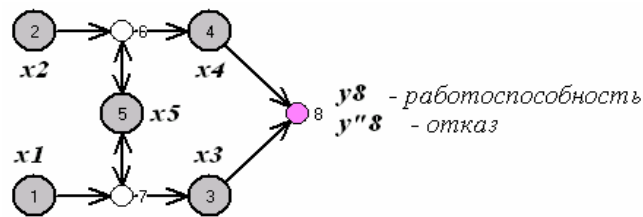


Рис. 2.4.4. СФЦ мостиковой системы

Пример 1. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения

Для заданных (см. табл.2.4.8.) вероятностных параметров надежности элементов на основе СФЦ, изображенной на рис.2.4.4 и критерия работоспособности $Y_c = y_8$ в ПК АСМ СЗМА вычислены следующие показатели надежности невосстанавливаемой мостиковой системы.

Таблица 2.4.8.

Средняя наработка до отказа элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0÷10000 час.)	Средняя наработка до отказа системы (час)
$T_i=12500\text{ч}$ (1.43 год) ($i=1,2,5$) $T_i=15625\text{ч}$ (1.78 год) ($i=3,4$)	0.473144408302	11256.6

На рисунке 2.4.4 приведено основное окно ПК АСМ СЗМА с решением данного примера

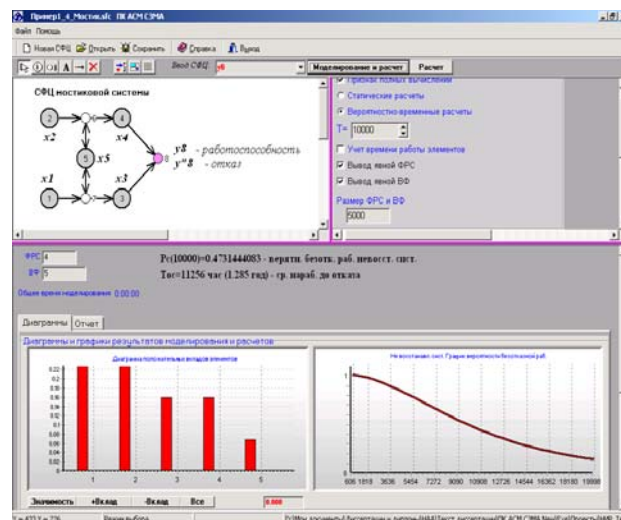


Рис. 2.4.4. Результаты решения задачи «мостик» на ПК САМ СЗМА

Вычисленные ПК АСМ СЗМА значения вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа мостиковой системы практически совпали с результатами, полученными с помощью модуля Relx RBD (см. табл.2.4.1). Расчет показателя интенсивности

отказа системы в заданной временной точке, в ПК АСМ в настоящее время, не реализован.

С помощью ПК Risk Spectrum выполнено решение обратной задачи и вычислено два значения вероятности отказа мостиковой системы **0.6029** и **0.5642** (см. табл.2.4.13). После пересчета получаем следующие значения вероятностей безотказной работы

$$1 - 0.6029 = 0.3971 \quad \text{и} \quad 1 - 0.5642 = 0.4358$$

Обе вероятности не совпали с результатом расчета этого показателя модулем Relx RBD (см. табл.2.4.1) и ПК АСМ СЗМА (см. табл.2.4.8). Однако расчеты с помощью 3-го уровня аппроксимации ПК Risk Spectrum ближе к правильному результату.

Расчеты средней наработки до отказа и интенсивности отказа во временной точке 10000 ч. в ПК Risk Spectrum не выполнялись.

Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения

Для заданных в таблице вероятностных параметров надежности элементов на основе СФЦ, изображенной на рис.2.4.4 и критерия работоспособности $Y_C = y^8$ в ПК АСМ СЗМА вычислены следующие показатели надежности восстанавливаемой мостиковой системы, см. таблицу 2.4.9

Таблица 2.4.9.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)	Коэффициент готовности системы в точке 10000ч	Среднее время восстановления системы (ч)	Средняя наработка на отказ (ч)
$T_i = 12500\text{ч}$ (1.43 лет) $(i = 1,2,5)$ $T_i = 15625\text{ч}$ (1.78 лет) $(i = 3,4)$	$T_{vi} = 100\text{ч}$ $(i = 1 \div 5)$	0.979296787	0.99989578398	49.8152	477949.6

На рисунке 2.4.5 приведено основное окно ПК АСМ СЗМА с решением данного примера

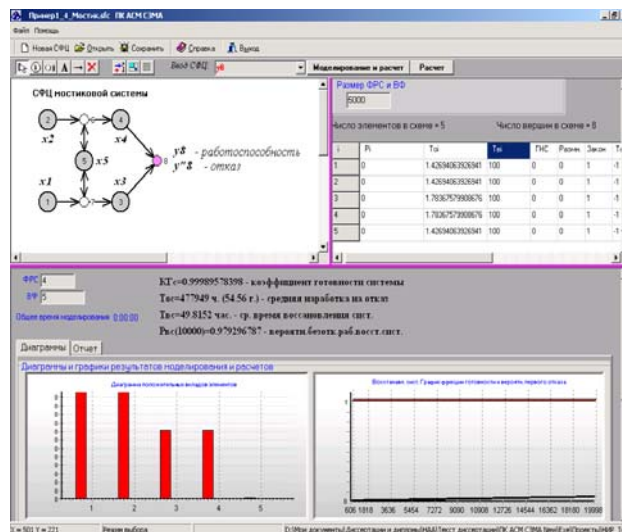


Рис. 2.4.5. Результаты решения задачи «мостик» на ПК САМ СЗМА (с учетом восстановления элементов)

Расчет показателя «Среднее время между отказами» (MTBF) может быть выполнен по правилу пересчета

$$MTBF = T_{OC} - T_{BC} = 477949 - 49.82 = 477899.18 \text{ час,}$$

что практически совпадает с результатом, полученным с помощью Relex RBD (см. табл.2.4.2).

С помощью ПК Risk Spectrum выполнено решение только обратной задачи и вычислено значение коэффициента неготовности мостиковой системы, равного **1.042E-4** (см. табл.2.4.14). После пересчета получаем следующее значения коэффициента готовности

$$1 - 1.042E-4 = \mathbf{0.9998958},$$

что практически совпадает с результатами расчета этого показателя модулем Relex RBD (см. табл.2.4.2) и ПК АСМ СЗМА (см. табл.2.4.9). Остальные показатели надежности восстанавливаемой мостиковой системы (см. табл.2.4.2 и табл.2.4.9) в ПК Risk Spectrum не вычислены.

Пример 3. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработки до отказа элементов

Исходные данные этого примера совпадают с описанием примера 3 п.2.4.2. В технологии АСМ разработаны и внедряются в программные комплексы автоматизированного моделирования аналитические методы композиции различных законов распределения времени безотказной работы элементов исследуемых систем, в частности, закона распределения Вейбулла-Гнеденко.

$$P_c(t) = EXP\left\{-\frac{1}{\eta}t\right\}^\beta$$

Результаты решения данного примера приведены в таблице 2.4.10.

Таблица 2.4.10.

Параметр распределения Вейбулла-Гнеденко	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)
$\eta_i = 13998,073865 \text{ час} =$ $= 1.59795363755 \text{ год.}$ $i - 1, 2, 5.$ $\eta_i = 17497.592331 \text{ час} =$ $= 1.997442046917 \text{ год.}$ $i - 3, 4.$ $\beta_i = 3, i = 1, 2, \dots, 5.$	0.8620568

На рисунке 2.4.6 изображено рабочее окно утилиты композиции различных законов распределения вероятностей безотказной работы элементов системы (статические вероятности, экспоненциальный, нормальный, логнормальный и Вейбулла-Гнеденко) с решением данного примера.

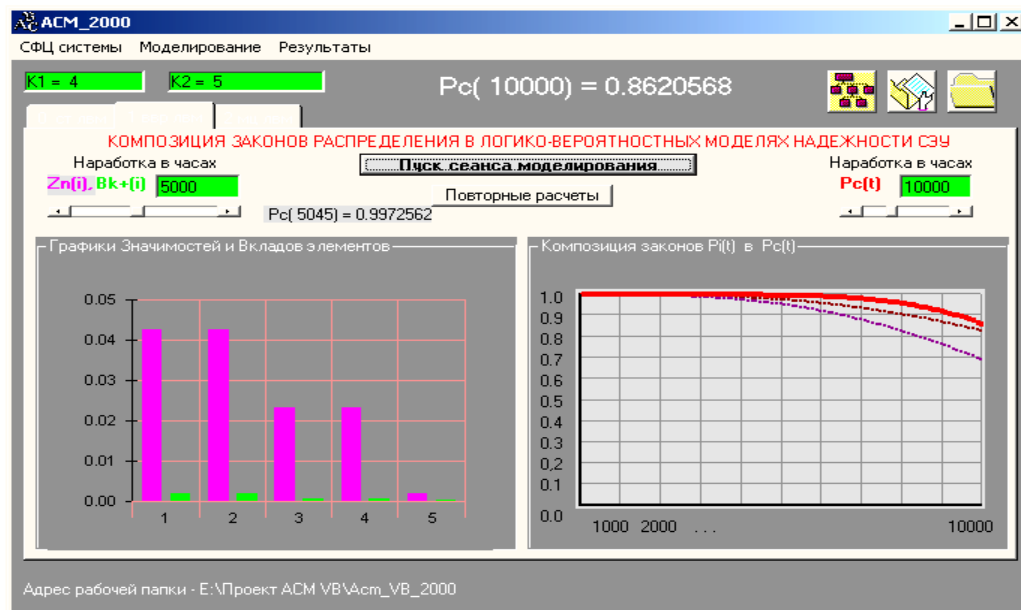


Рис. 2.4.6. Рабочее окно утилиты композиции различных законов распределения вероятностей безотказной работы элементов системы

Полученный в технологии ACM результат аналитического расчета вероятности безотказной работы **0.8620568** мостиковой системы практически совпал со значением этого показателя, полученного с помощью модуля Relex RBD (см. табл.2.4.3).

Решение этого примера с помощью ПК Risk Spectrum не приведено. Как отмечают специалисты СПБАЭП, в ПК Risk Spectrum предусмотрено использование только экспоненциального закона наработок до отказа элементов (см. §2.4.4 пример 4).

Вычисление средней наработки до отказа (MTTF) для закона распределения Вейбулла-Гнеденко элементов в ПК ACM в настоящее время не производится.

Пример 4. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления

Методы решения задач этого класса в технологии и ПК ACM в настоящее время не реализованы.

Решение этого примера с помощью ПК Risk Spectrum не приведено. Как отмечают специалисты СПБАЭП, в ПК «Risk Spectrum» предусмотрено использование только экспоненциального закона наработок до отказа элементов (см. §2.4.4 пример 5).

Пример 5. Второй вариант расчета надежности невозстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов

Исходные данные этого примера и его решение с помощью модуля Relex RBD приведено в §2.4.2, пример 5.

Решение данного примера в технологии ACM выполнено с помощью специальной версии программного комплекса, выполняющего композицию четырех законов распределения времени безотказной работы элементов – экспоненциального, нормального, логнормального и Вейбулла-Гнеденко. Результаты решения данного примера приведены в табл.2.4.11.

Таблица 2.4.11.

Параметр распределения Вейбулла-Гнеденко	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)
$\eta_i = 10772,17345 \text{ час} = 1.2297 \text{ год.}$ $i - 1, 2, 5.$ $\eta_i = 11603.972084 \text{ час} = 1.324654347 \text{ год.}$ $i - 3, 4.$ $\beta_i = 3, i = 1, 2, \dots, 5.$	0.4731448

Полученный в технологии АСМ результат данного варианта аналитического расчета вероятности безотказной работы невозстанавливаемой мостиковой системы практически совпал со значением этого показателя, полученного с помощью модуля Relex RBD (см. табл.2.4.5).

Решение этого примера с помощью ПК «Risk Spectrum» не приведено.

Вычисление средней наработки до отказа (MTTF) в ПК АСМ в настоящее время не реализовано.

Пример 6. Расчет надежности восстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления.

Методы решения задач этого класса в технологии и ПК АСМ в настоящее время не реализованы.

Пример 7. Решение задачи "Мостик" с учетом отказов по общей причине

Методы решения задач этого класса в технологии и ПК АСМ в настоящее время не реализованы.

Результаты решения этого примера с помощью ПК «Risk Spectrum» приведены в §2.4.4, Пример 6.

Пример 8. Решение задачи "Мостик" на основе СФЦ, эквивалентной дереву отказов.

Описание и решение этой задачи с помощью ПК Risk Spectrum рассмотрено в §2.4.4, Пример 1. На следующем рисунке приведена СФЦ, которая является точной копией дерева отказов мостиковой системы, приведенной на рис.2.4.10.

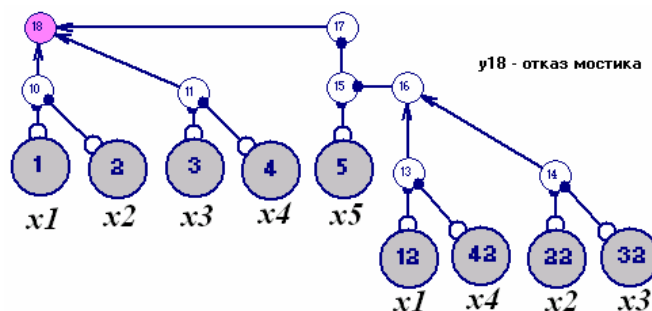


Рис. 2.4.7. СФЦ мостиковой схемы, аналогичная дереву отказов на рис.2.4.10

Выполняя на основе данной СФЦ решение этой задачи с помощью ПК АСМ 2001, при параметрах надежности элементов заданных в табл.2.4.13 получаем следующие результаты (см. рис.2.4.8):

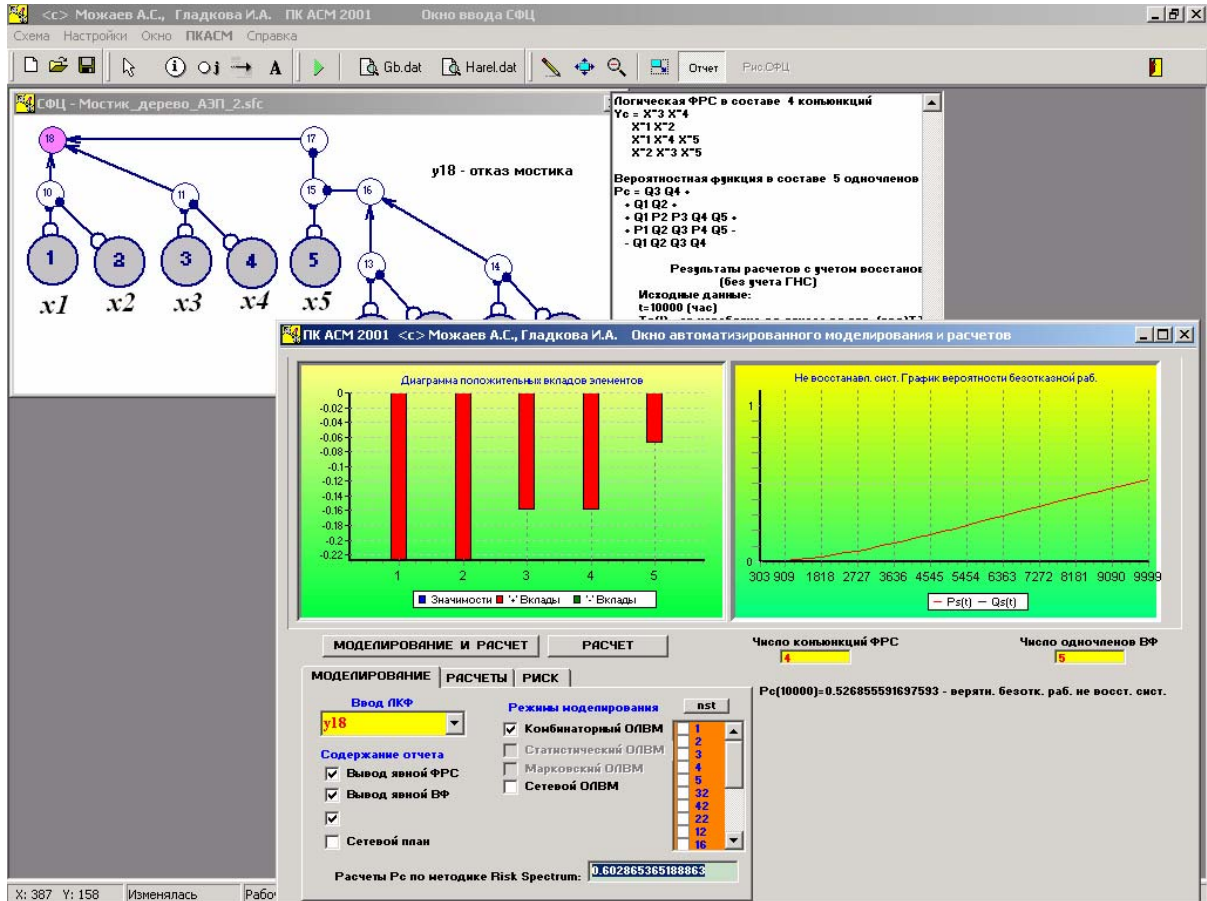


Рис. 2.4.8. Результаты решения по СФЦ, аналогичной дереву отказов

В данном решении логическая ФРС (см. окно "Отчет" на рис.2.4.8) включает четыре конъюнкции, которые представляют МСО рассматриваемой мостиковой системы:

$$Y_c = y18 = \begin{vmatrix} x1 & x2 \\ x3 & x4 \\ x1 & x4 & x5 \\ x2 & x3 & x5 \end{vmatrix}$$

Указанные МСО полностью совпали с базовыми событиями, полученными в на ПК Risk Spectrum и приведенными в табл.2.4.12.

Результаты расчета вероятности отказа рассматриваемой мостиковой системы, на основе дерева отказов, вычисленные в ПК АСМ 2001 по автоматически построенной точной вероятностной функции, составили

$$Qc(10\ 000\ \text{ч.}) = 0.526855591698.$$

Этот результат не совпадает ни с одной вероятностью отказа, полученной с помощью ПК Risk Spectrum (см. табл.2.4.13). Однако пересчет на ее основе вероятности безотказной работы мостиковой системы, составил

$$Pc(10\ 000\ \text{ч.}) = 1 - Qc = 1 - 0.526855591698 = 0.473144408302,$$

что точно совпало с результатами расчета этой характеристики с помощью ПК АСМ СЗМА на основе СФЦ блок-схемы (см. табл.2.4.8) и с помощью модуля Relex RBD (см. табл.2.4.1).

На рис.2.4.9 приведены результаты автоматизированного моделирования и расчета на основе СФЦ дерева отказа (см. рис.2.4.7) характеристики безотказности рассматриваемой мостиковой системы. Для этого достаточно только заменить логический критерий отказа системы y_{18} на противоположный логический критерий y_{18}^* (в данном случае – критерий работоспособности).

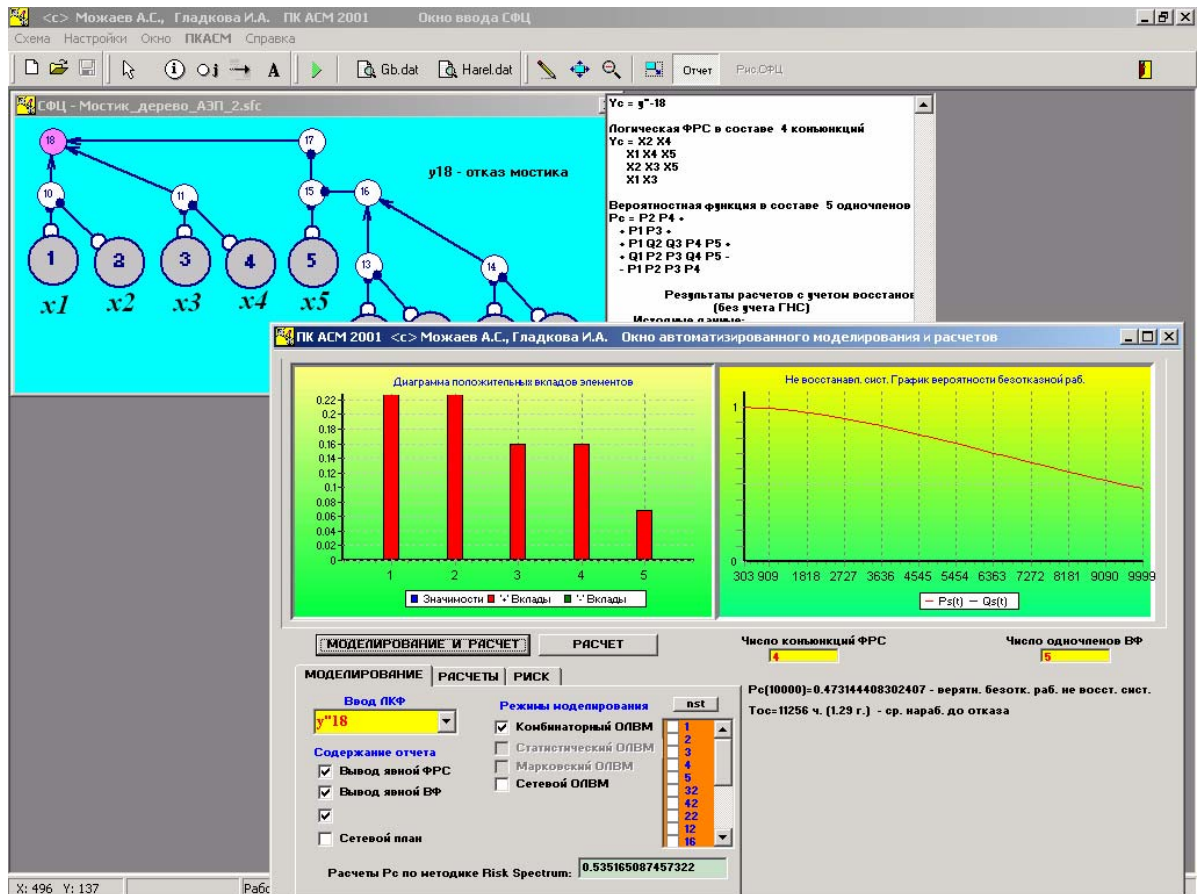


Рис. 2.4.9. Результаты анализа работоспособности мостиковой системы на основе СФЦ дерева отказов

Все полученные результаты моделирования и расчетов точно совпали с результатами анализа данной системы на основе блок-схемы (см. табл.2.4.8 и рис.2.4.4)

Следует отметить, что расчет вероятности отказа мостиковой системы, выполненный в ПК АСМ 2001 с помощью внедренной в него методики вычисления вероятностных характеристик из документации на ПК Risk Spectrum, дал следующий результат (см. нижнюю строку на рис.2.4.9)

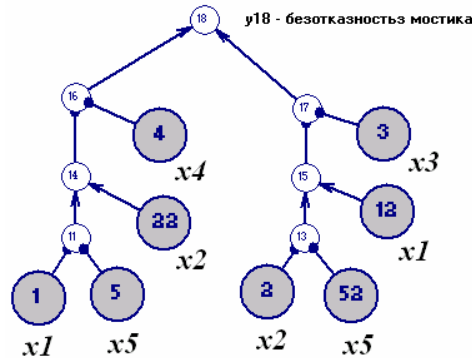
0.602865365188863.

Эта вероятность отказа мостиковой системы точно совпадает с результатом расчета данной характеристики с помощью самого ПК Risk Spectrum (см. табл.2.4.13, 1-й уровень аппроксимации).

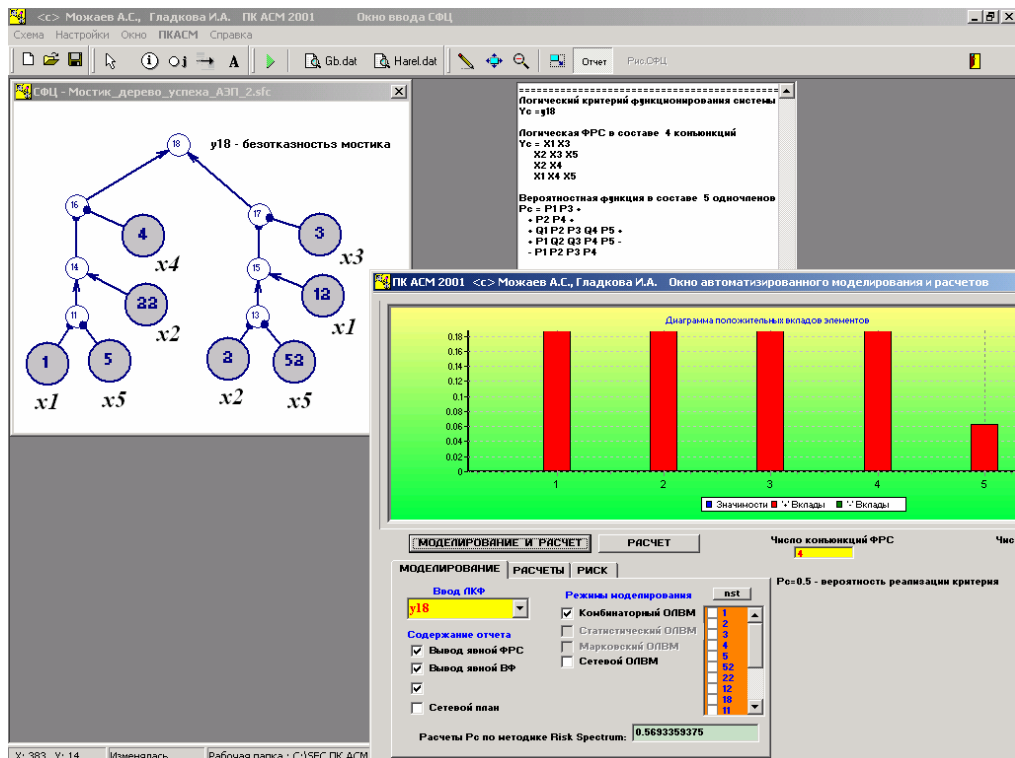
Пример 9. Решение на ПК АСМ прямой задачи «Мостик» на основе СФЦ дерева "успеха"

Исходные данные этой задачи сформулированы специалистами СПБАЭП в Примере 3 следующего §2.4.4. Решения этой задачи методами и программными средствами технологии АСМ дали следующие результаты.

1. На рис. 2.4.11 приведено дерево "успеха" рассматриваемой мостиковой системы, которое использовалось в Примере 3 §2.4.4 для решения прямой задачи "Мостик" с помощью ПК Risk Spectrum. На следующем рисунке приведена СФЦ, точно соответствующая указанному дереву «успеха» мостиковой системы (см. рис.2.4.11)

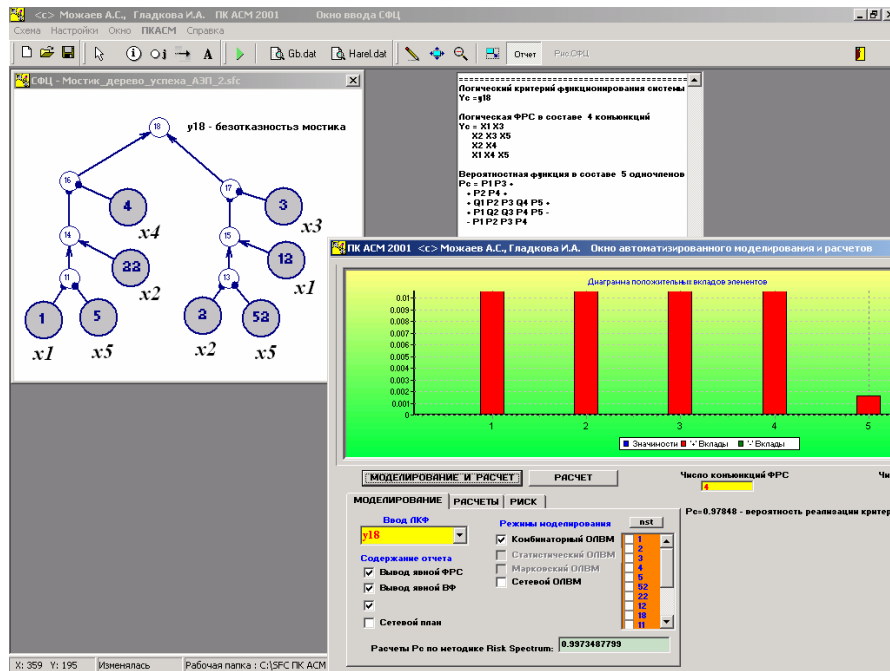


2. Результаты автоматизированного моделирования и расчета вероятности безотказной работы на ПК АСМ 2001 при заданной вероятности безотказной работы элементов системы $p_i = 0.5$ приведены на следующем рисунке



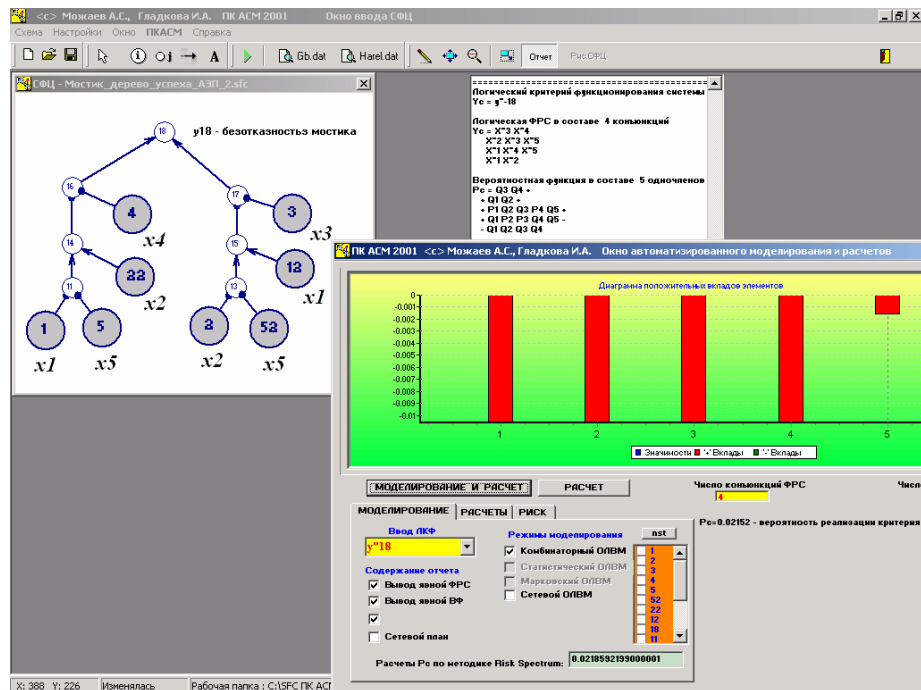
Вероятность безотказной работы данной системы, полученная на ПК АСМ 2001 и других комплексах, реализующих технологию АСМ (ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ весия 0.5, ПК АСМ NEW, ПК АСМ NEW 3) составила величину **0.5**. На ПК Risk Spectrum получены завышенные значения вероятности безотказной работы этой системы – **0.5693** при использовании первого уровня аппроксимации, и **0.5313**, при использовании третьего уровня аппроксимации (см. §2.4.4, Пример 3).

3. Расчеты на ПК АСМ для значений параметров элементов $p_i = 0.9, q_i = 1 - p_i = 0.1$ дали следующие результаты.



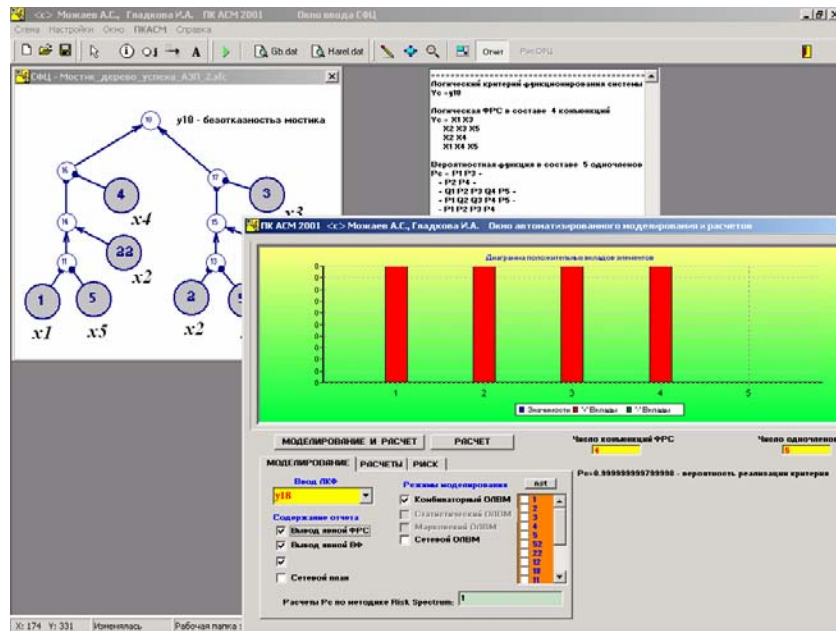
Точное значение вероятности безотказной работы составило **0.97848**. На ПК Risk Spectrum опять получено завышенное значения вероятности безотказной работы этой системы – **0.9973** при использовании первого уровня аппроксимации (см. §2.4.4, Пример 3).

4. Результаты решения на ПК АСМ обратной задачи на основе критерия y^{18} отказа системы составили



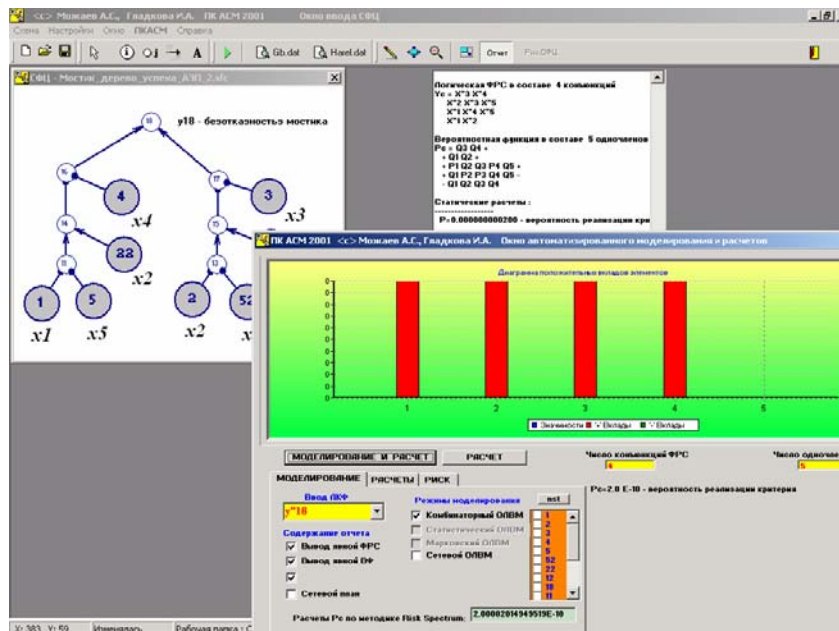
Точное значение вероятности отказа системы составило **0.02152**. На ПК Risk Spectrum опять получены завышенные значения вероятности отказа этой системы – **0.02186** при использовании первого уровня аппроксимации, и **0.02179** – при 3-м уровне аппроксимации (см. §2.4.4, Пример 3).

5. Расчеты на ПК АСМ для значений параметров элементов $p_i = 0.99999$ дали следующие результаты.



Точное значение вероятности безотказной работы составило **0.999999999700008**. На ПК Risk Spectrum опять получено завышенное значения вероятности безотказной работы этой системы 1.0 (см. §2.4.4, Пример 3).

6. Результаты решения на ПК АСМ обратной задачи для $p_i = 0.99999$ на основе критерия y^{18} отказа системы составили



Точное значение вероятности отказа составило **2.0E-10**, что совпало с результатами, полученными на ПК Risk Spectrum (см. §2.4.4, Пример 3).

Пример 10. Задача «Мостик» с учетом принятой стратегии технического обслуживания и ремонта

Постановка и результаты решение данной задачи специалистами СПБАЭП с помощью ПК Risk Spectrum приведены в Примере 7 следующего §2.4.4. Решения задач данного класса методами и программными средствами технологии АСМ в настоящее время не осуществляется.

2.4.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

Пример 1. Расчет надежности невозстанавливаемой мостиковой системы с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения.

Дерево отказов мостиковой схемы представлено на рисунке 2.4.10.

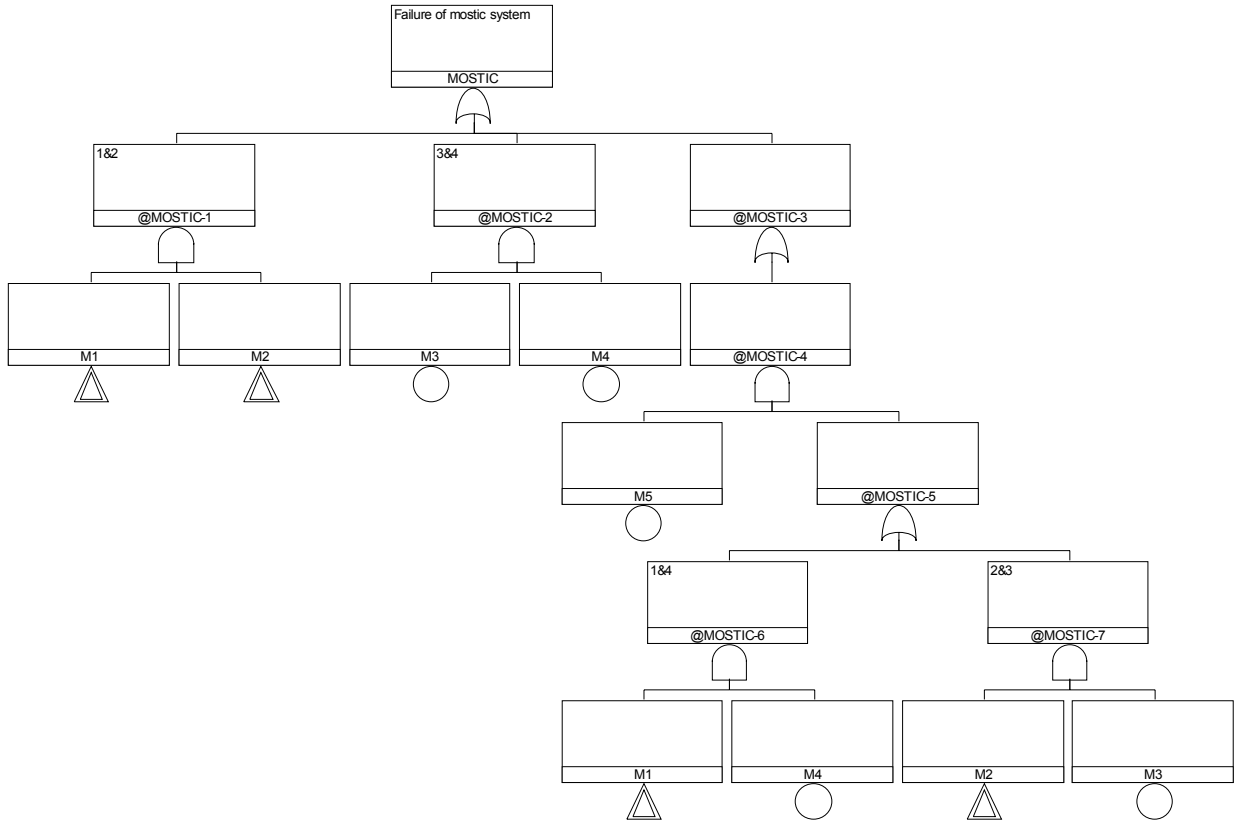


Рис. 2.4.10 Дерево отказов для задачи «Мостик»

Минимальные сечения отказов представлены в таблице 2.4.12.

Таблица 2.4.12.

N/N	вероятность МСО	вклад МСО	обозначения базовых событий МСО		
1	0.3043	53.76	M1	M2	
2	0.2244	39.64	M3	M4	
3	0.1442	0.1442	M1	M4	M5
4	0.14.42	0.1442	M2	M3	M5

Результаты расчетов представлены в таблице 2.4.13.

Таблица 2.4.13.

Средняя наработка до отказа элементов	Вероятность отказа системы на интервале (0÷10000)
<p>$T_i=12500\text{ч}$ ($i = 1,2,5$)</p> <p>$T_i = 15625\text{ч}$ ($i = 3,4$)</p> <p>$T_c = 10\ 000$ час</p>	<p>0.6029 (1-й уровень аппроксимации)</p> <p>0.5642 (3-й уровень аппроксимации)</p>

Как и следовало ожидать, при задании относительно низких показателей надежности элементов мостика результаты расчетов оказались отличающимися от точного решения в консервативную сторону. Однако применение 3-го уровня аппроксимации позволило значительно снизить расхождение результатов.

Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.4.14.

Таблица 2.4.14.

Средняя наработка до отказа элементов	Среднее время восстановления элементов	Коэффициент неготовности системы в точке 10000ч
$T_i = 12500\text{ч}$ ($i = 1,2,5$) $T_i = 15625\text{ч}$ ($i = 3,4$)	$T_{vi} = 100\text{ч}$ $(i = 1 \div 5)$	$1.042E-4$ <small>0.999999901167</small>

В данном случае результаты расчетов практически совпали с результатами расчетов по другим кодам, причем результаты расчетов по ПК Relex и Risk Spektrum оказались ближе друг к другу, чем к результатам решения по ПК АСМ.

Пример 3. Решение прямой задачи «Мостик» на ПК «Risk Spectrum».

Дерево «успеха» мостиковой схемы для прямой задачи представлено на рис. 2.4.11.

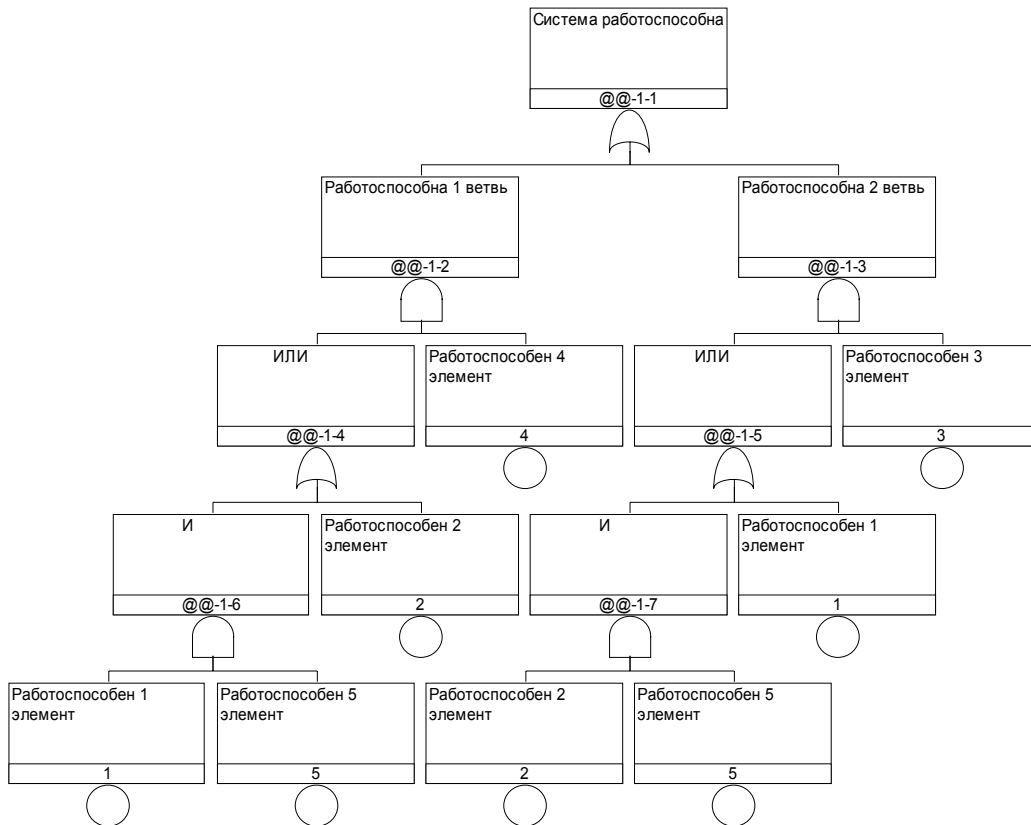


Рис. 2.4.11. Дерево «успеха» для задачи «Мостик»

Задача решалась при заданной вероятности безотказной работы элементов системы $P_i = 0,5$. При этом вероятность безотказной работы схемы составила величину **0,5693**. При решении обратной задачи по дереву отказов рис. 2.4.10 и $q_i = 0,5$ вероятность отказа системы также равна **0,5693**. Это позволяет утверждать, что деревья отказов построены адекватно друг другу. При использовании 3-го уровня аппроксимации и $q_i = 0,5$ вероятность отказа системы, рассчитанная по обоим ДО, равна **0,5313**.

Затем расчеты были повторены при $P_i = 0,9$ и $q_i = 0,1$. При этом вероятность безотказной работы системы составили **0,9973**, а вероятность отказа – **0,02186 (0,02179** – при 3-м уровне аппроксимации).

Далее были произведен третий вариант расчета, при $P_i = 0,99999$ и $q_i = 0,00001$. При этом вероятность безотказной работы системы составили **1,0**, а вероятность отказа – **2E-10** (и при 1-м и при 3-м уровне аппроксимации).

Т.о., можно утверждать, что ПК «Risk Spectrum» дает завышенные оценки как вероятности безотказной работы, получаемой по «дереву успеха», так и вероятности отказа. Естественно, что при этом их сумма превышает **единицу**.

Отсюда следует, что при практических расчетах необходимо использовать только деревья отказов, как это, собственно говоря, и предусмотрено в технологии данного кода. При этом обеспечено получение сугубо консервативных оценок показателей надежности и безопасности. Ошибка расчета идет при этом в «запас». Консервативная (меньшая, чем в действительности) оценка вероятности безотказной работы получается при этом путем вычитания из единицы вероятности отказа.

Пример 4. Расчет надежности невозстанавливаемой мостиковой схемы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов.

В ПК «Risk Spectrum» предусмотрено использование только экспоненциального закона наработок до отказа элементов.

Пример 5. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой схемы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов и экспоненциальным законом времени их восстановления.

В ПК «Risk Spectrum» предусмотрено использование только экспоненциального закона наработок до отказа элементов

Пример 6. Решение задачи «Мостик» с учетом отказов по общей причине

Задача решалась по дереву отказов мостиковой схемы, представленному на рис.2.4.10.

Для расчета вероятности отказа системы с учетом отказов по общей причине была сформирована группа элементов которая может иметь отказ по общей причине 1-ого и 2-ого элементов. В качестве модели отказа по общей причине принята модель **альфа-фактора** с коэффициентом **$\alpha_2 = 5,00E-02$** .

Результаты расчетов представлены на рисунке 2.4.12.

Как следует из рис. 2.4.12, для заданной вероятности отказа элементов **0,5** вероятность отказа системы составила **0,5531** и **0,5152** (1-й и 3-й уровень аппроксимации). Количество минимальных сечений отказов увеличилось на 1, добавилось сечение, представляющее одновременный отказ элементов 1 и 2.

Нетрудно заметить, что при данных расчетах получен парадоксальный результат – наличие общей причины отказа элементов 1 и 2 привело к уменьшению вероятности отка-

за мостиковой схемы. Кстати говоря, аналогичный результата получен и при решении данной задачи с помощью ПК Relex.

В связи с этим расчеты были повторены, как без учета ООП, так и с учетом ООП, при задании низкой вероятности отказа элементов схемы $Q_i = 0.00001$. Результаты расчетов с учетом ООП представлены на рис. 2.4.13.

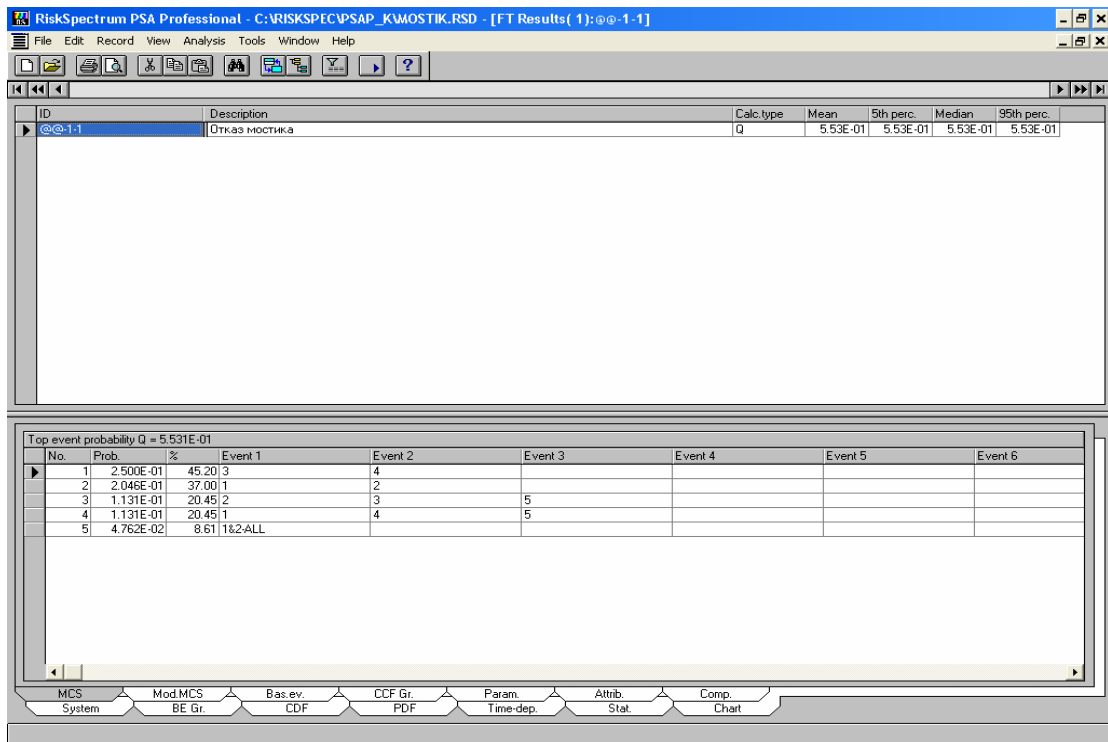


Рис. 2.4.12. Результаты расчетов надежности мостиковой схемы с учетом ООП при вероятности отказа элементов 0.5.

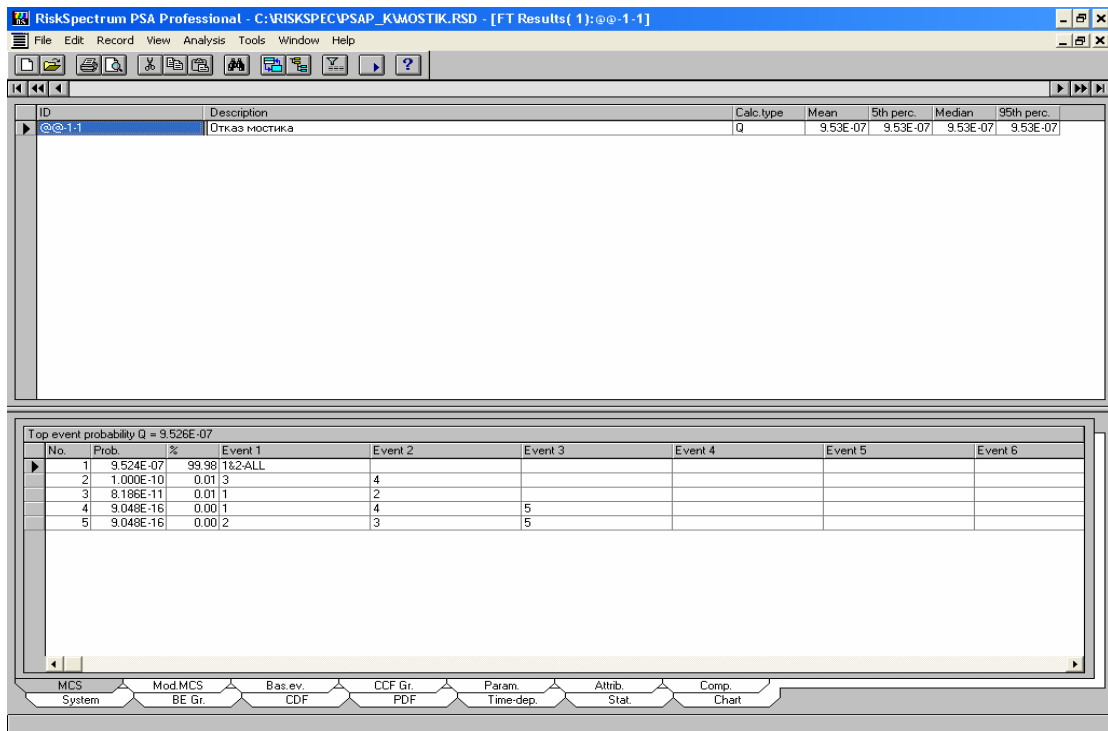


Рис. 2.4.13. Результаты расчетов надежности мостиковой схемы с учетом ООП при малой вероятности отказа элементов.

Как следует из рис. 2.4.13, при малой вероятности отказов элементов вероятность безотказной работы мостиковой схемы без учета ООП составила $2 \cdot 10^{-10}$, а с учетом ООП – $9.526 \cdot 10^{-7}$. Данный результат вполне соответствует физическому смыслу ООП.

В завершение исследования данного примера был произведен расчет надежности восстанавливаемой мостиковой схемы с условиями примера №2 и с учетом ООП. Результаты этих расчетов представлены на рис. 2.4.14.

Как следует из этого рисунка вероятность отказа восстанавливаемой мостиковой схемы с учетом ООП составила $8.485 \cdot 10^{-4}$, что также вполне согласуется со здравым смыслом.

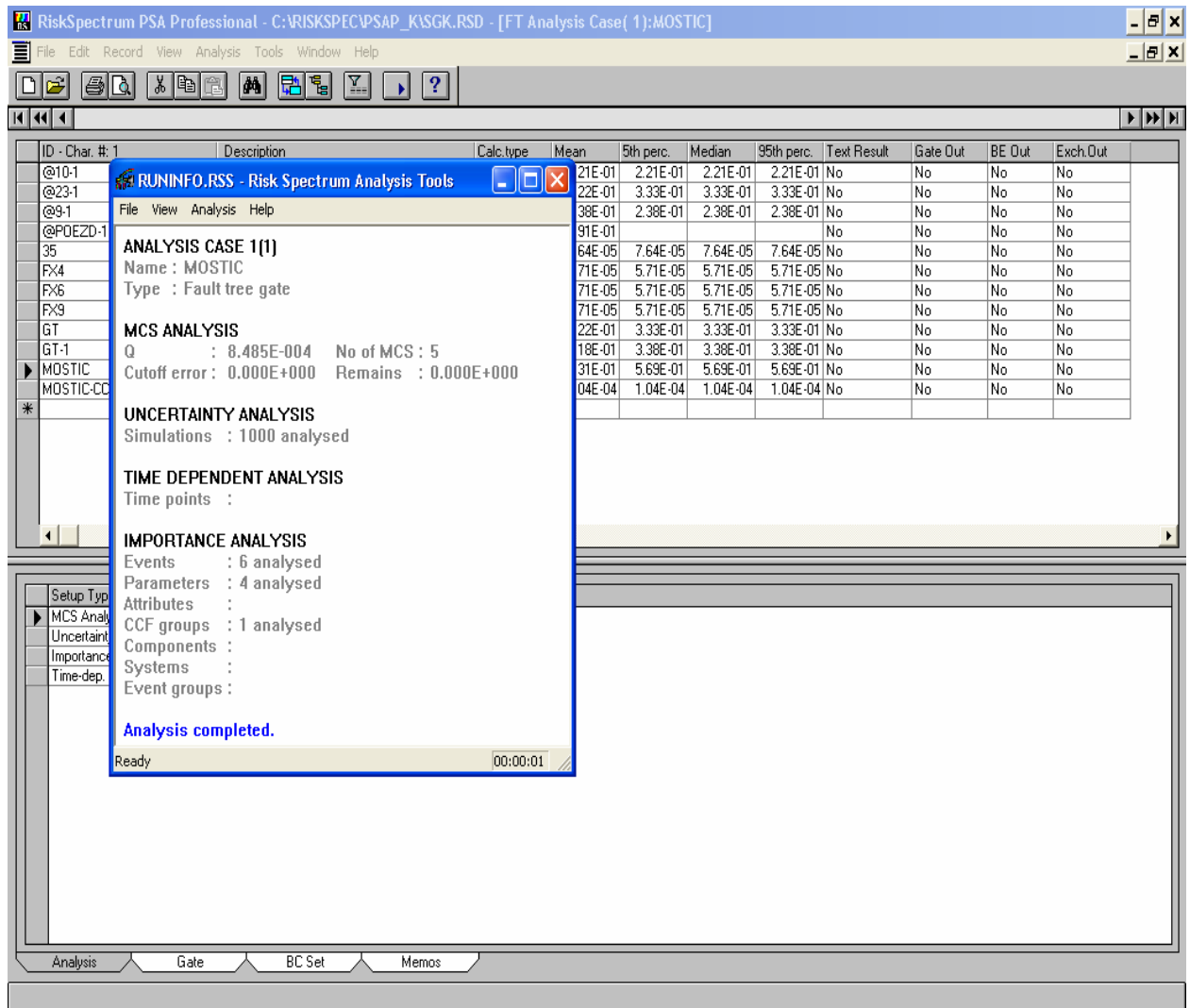


Рис. 2.4.14. Результаты расчетов надежности восстанавливаемой мостиковой схемы с учетом ООП.

Пример 7. Решение задачи «Мостик» с учетом принятой стратегии технического обслуживания и ремонта

Необходимо рассчитать вероятность отказа мостиковой схемы при собственных параметрах надежности элементов аналогичных заданным в примере №2 ($\lambda_{1,2,5} = 8 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_{3,4} = 6.4 \cdot 10^{-5}$, $T_{в1,5} = 100$ ч) при дополнительном условии, состоящем в том, что элементы 1-4 подвергаются периодическим проверкам и восстановление производится только после окончания проверки. Периодичность проверки 720 часов. Первая проверка элементов 2, 4 производится через 360 часов работы, а элементов 1, 3 – через 720 часов.

При этих условиях вероятность отказа системы составила $2.151 \text{ E-}3$ (при обоих уровнях аппроксимации).

Далее было произведено несколько расчетов при варьировании отдельных параметров.

При условии, что время восстановления составляет 20 часов, вероятность отказа системы составила $2.151 \text{ E-}3$.

При условии, что элемент №5 (перемычка) не восстанавливается, вероятность отказа системы составила $4.215 \text{ E-}3$ и $4.117 \text{ E-}3$ для 1-го и 3-го уровня аппроксимации соответственно.

Результаты решения данного примера показывают, что учет фактической стратегии ТОР позволяет получать более адекватные результаты расчетов, чем использование теоретических законов восстановления.

Сводная таблица результатов раздела 2.4. "Расчет надежности мостиковой схемы"					
Примеры	Параметры и характеристики задач	Результаты моделирования и расчетов			
		Relax	ПК ACM	Risk Spectrum	
1	2	3	4	5	
Пример 1. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения. Ti=12500ч (i =1,2,5) Ti = 15625ч (i = 3,4) t = 10 000 час	Вероятн. безотк. работы	0.473144	0.473144408	0.5642	
	Ср. наработка до отказа (час)	11256.6289	11256.6	не вычисляется	
	Интенсивность отказов сист. (1/час)	120.28e-6	не вычисляется	не вычисляется	
Пример 2. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения	Ti = 12500ч. (i = 1,2,5) Ti = 15625ч. (i = 3,4) t = 10 000 ч.	Вер. безот. раб. СЭС	0.9793	0.979296787	не вычисляется
		Коэффициент готовн.	0.999895784	0.999895784	0.9998958 0.999999901167
		Hazard Rate (величина обратная средней наработке между отказами)	2.0922706e-6	2.0924916e-6	не вычисляются
		Среднее время между отказами (MTBF)	477999.4	477999.39	
		Среднее время между восст. системы (час).	49.8	49.8152	
		Средняя наработка на отказа системы (час)	477949.55	477949.58	
Пример 3. Расчет надежности невосстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов	ηi = 13998.073865 ч. (i = 1,2,5) ηi = 17497.592331 ч. (i = 3,4)	Вероятность безотказной работы (t = 10000 ч.)	0.862	0.8620568	не вычисляются
		Среднее наработка до отказа (MTTF) (ч)	13510	не вычисляется	
Пример 4. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления.	ηi = 13998.073865 ч. (i = 1,2,5) ηi = 17497.592331 ч. (i = 3,4) Twi=100 ч. t = 10 000 ч.	Вероятность безотказной работы системы	0.985	не вычисляются	не вычисляются
		Коэффициент готовности системы	0.999908		
		Hazard Rate (величина обратная средней наработке между отказами)	1.5e-6		
		Среднее время между отказами (MTBF) (час)	481316		
Пример 5. Расчет надежности невосстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов.	ηi = 10772.17345 ч. (i = 1,2,5) ηi = 11603.97208 ч. (i = 3,4)	Вероятность безотказной работы системы на интервале (0 ÷ 10000ч)	0.473144	0.4731448	не вычисляются
		Среднее наработка до отказа (MTTF) (ч)	9875.34	не вычисляется	
Пример 6. Расчет надежности восстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления	ηi = 10772.17345 ч. (i = 1,2,5) ηi = 11603.972084 ч. (i = 3,4) Twi = 100 ч. t = 10 000 ч.	Вероятность безотказной работы	0.982	не вычисляются	не вычисляются
		Коэффициент готовности системы	0.999727		
		Hazard Rate	1.8e-6		
		Среднее время между отказами (MTBF) (час)	252104		

1		2	3	4	5
Пример 7. Решение задачи "Мостик" с учетом отказов по общей причине	без учета ССФ	Вероятность отказа системы	вероятность отказа i-го элемента: 0.5 ($i=1 \div 5$)	не вычисляются	-
	с учетом ССФ		вероятность отказа i-го элемента: 0.5 ($i=3 \div 5$), 0.452381 ($i=1 \div 2$)		0.5152
Пример 8. Решение задачи "Мостик" на основе дерева отказов и СФЦ, эквивалентной дереву отказов. $T_i=12500$ ч ($i=1,2,5$) $T_i=15625$ ч ($i=3,4$) $t=10\,000$ час		Минимальные сечения отказов	<i>Логические модели совпали</i>		
			4	4	4
		Вероятн. отказа мостиковой сист.	0.526856	0.526855592	0.6029 (1 ур.) 0.5642 (3 ур.)
		Ср. наработка до отказа (час)	11256.6	11256.6	не вычисляется
Пример 9. Решение прямой задачи "Мостик" на основе дерева "успеха" и СФЦ, эквивалентной дереву "успеха"		Минимальные сечения отказов	<i>Логические модели совпали</i>		
			4	4	4
		Вероятн. отказа сист. при $p_i = 0.5$	0.5	0.5	0.5693 (1 ур.) 0.5313 (3 ур.)
		Вероятн. безотказн. раб. при $p_i = 0.9$	0.978480	0.97848	0.9973
		Вероятн. отказа сист. при $p_i = 0.9$	0.021520	0.02152	0.02186 0.02179
		Вероятн. безотказн. раб. при $p_i = 0.99999$	1.0	0.999999997	1.0
		Вероятн. отказа сист. при $p_i = 0.99999$	2.0002e-8	2.0E-10	2 E-10
Пример 7, §2.4.4. Решение задачи «Мостик» с учетом принятой стратегии технического обслуживания и ремонта $\lambda_{1,2,5} = 8 \text{ E-}5$, $\lambda_{3,4} = 6.4 \text{ E-}5$, $T_{в1,5} = 100$ ч. Периодичность проверки элементов 1-4 составляет 720 часов		Вероятность отказа системы $T_{в1,5} = 100$ ч	не вычислялись	не вычисляются	2.151 E-3
		Вероятность отказа системы $T_{в1,5} = 20$ ч			2.151 E-3
		элемент №5 (перемычка) не восстанавливается			4.215 E-3 4.117 E-3

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.4

Выводы специалистов ИПУ РАН

В данном разделе помимо проверок точности решения классических логико-вероятностных задач и оцениваемого списка показателей (примеры 1,2, 8,9) анализировались ещё возможности учета следующих факторов, особенностей:

- неэкспоненциальности распределений (примеры 3-6);
- отказов по общей причине (пример 7);
- одной из стратегий технического обслуживания и ремонта (пример 7 §2.4.4).

Примеры с неэкспоненциальностью распределений решены только на ПК Relex и в двух случаях (из четырех) на ПК АСМ.

Отказы по общей причине учитываются только в ПК Relex и в ПК Risk Spectrum.

Относительно учета в моделях стратегий технического обслуживания и вычисляемых для этого показателей дело обстоит сложно. Такие задачи требуется более тщательно описывать и предварительно обсуждать, чтобы было достигнуто единое понимание модельных особенностей. Зная некоторые постановки задач проверок и обслуживания, изложенные в методиках по Атомной Энергетике, предполагаем, что каналы отключаются по очереди, так, что один канал всегда работает. Это не сказано в описании задачи и отсутствует информация о длительности проверок. В ПК Relex **не реализована** такая стратегия, но реализованы некоторые другие. Сейчас останавливаться на них не будем. Если в возможных дальнейших работах будет необходимость обсудить и решить какие-то задачи обслуживания, то мы готовы это сделать. Однако отметим, что приведенные специалистами СПбАЭП показатели не могут быть вероятностью отказа системы. Эта вероятность для описываемого случая при любой стратегии проверок и последующего восстановления будет не лучше (а на самом деле значительно хуже) вероятности отказа, полученной в примере 2 при мгновенном обнаружении отказа и начале восстановления (в примере 2 она равна 0.0207), не говоря уже об отключении работоспособного канала на проверку (что еще больше ухудшит эту вероятность). Скорее всего, это либо коэффициент неготовности в момент времени t , либо усредненный на интервале функционирования $(0,t)$ коэффициент неготовности. Причем последний, абсолютно необоснованно применяется и нормируется специалистами в атомной энергетике. В своё время ИПУ за подписью Директора и Генерального Конструктора АСУТП АЭС направлял по этому поводу замечания в НИКИЭТ и Московский АЭП.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Как и в предыдущих примерах, все результаты вычислений показателей надежности, полученные с помощью ПК АСМ (15 показателей), полностью совпали с соответствующими результатами, полученными с помощью ПК Relex RBD.
2. В настоящее время в технологии и ПК АСМ не реализованы методы вычисления показателей:
 - интенсивности отказов невосстанавливаемой системы в заданной временной точке (см. Пример 1);

- средней наработки до отказа невосстанавливаемой системы с распределением Вейбулла наработок до отказа элементов (см. Примеры 3, 5);
- показателей надежности восстанавливаемых систем с распределением Вейбулла наработок на отказ элементов и экспоненциальным распределением времени их восстановления (см. Пример 4, 6);
- показателей надежности систем с типовыми моделями отказов по общей причине (Пример 7) и с учетом стратегий технического обслуживания и ремонта (Пример 7, §2.4.4).

Специалисты СПИК СЗМА готовы к внедрению этих, в основном стандартных методов расчета показателей в ПК АСМ СЗМА в плановом порядке развития и адаптации данного программного комплекса к конкретным предметным областям.

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Все три программных комплекса позволяют решать задачи указанного класса.
 2. Результаты решения первого примера для данной задачи подтверждают ранее полученные выводы о том, что комплексы АСМ и Relex дают более точные решения.
 3. ПК Relex позволяет использовать более сложные, чем экспоненциальный, законы распределения показателей надежности (в частности, закон Вейбулла-Гнеденко). ПК АСМ позволяет использовать (с помощью специальной утилиты) четыре закона распределения – экспоненциальный, нормальный, Вейбулла-Гнеденко и логарифмически-нормальный. Код Risk Spectrum использует только экспоненциальный закон распределения.
 4. Коды Relex и Risk Spectrum позволяют моделировать и рассчитывать надежность систем с учетом отказов по общей причине (ООП), реализуя общепринятые модели ООП (β -фактора и др.). В коде АСМ такая возможность программным способом не реализована.
- В то же время оба кода (Relex и Risk Spectrum) при низкой надежности элементов дают явно неверные, противоречащие здравому физическому смыслу результаты – при наличии дополнительной (общей) причины отказов элементов системы ее надежность не уменьшается, а увеличивается! При задании высоких показателей надежности результаты решения более верны, по крайней мере, соответствуют здравому смыслу.
- ПК АСМ позволяет учитывать ООП только путем прямого отображения соответствующих случайных событий в графе СФЦ.
5. В отличие от ПК АСМ и Relex, ПК Risk Spectrum позволяет учитывать при моделировании и расчете показателей надежности и безопасности принятые стратегии технического обслуживания и ремонта элементов систем (проведение периодических проверок состояния оборудования, продолжительность периодов между проверками, время первой проверки и т.д.). Это позволяет получать более адекватные реальной практике результаты, чем использование теоретических законов восстановления.

2.5. Расчет производительности (пропускной способности) системы

2.5.1. Описание задачи

При эксплуатации сложных технических систем, как правило, имеется несколько вариантов функционирования, выполнения предписанных функций. Поэтому расчет надежности и безопасности ведется с учетом данного фактора. Зачастую бывает, что не все пути выполнения задачи бывают равнозначными по физическому характеру процессов, протекающих в системе. Например, резервный трубопровод может иметь меньшую пропускную способность. Это обстоятельство также необходимо учитывать при расчетах.

2.5.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Расчет производительности или пропускной способности (capacity) проведен для последовательно соединенных дублированного (1 из 2) и троированного (1 из 3) звена (рис. 2.5.1).

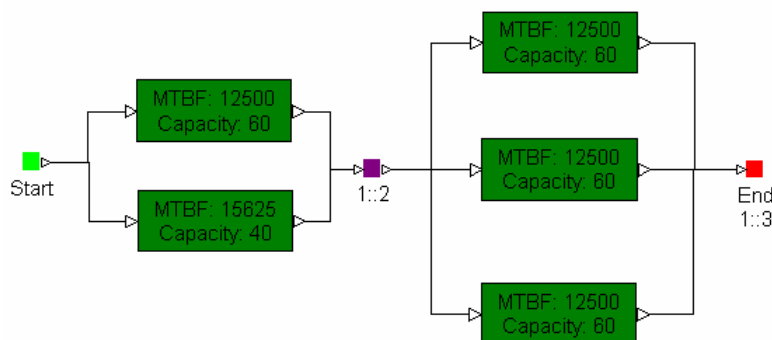


Рис. 2.5.1. Блок-схема для автоматизированного моделирования и расчета производительности системы в Relex RBD

Расчет проведен для следующих исходных данных:

- средняя наработка до отказа элементов $T_i = 12500\text{ч}$ ($i = 1, 3 \div 5$), $T_i = 15625\text{ч}$ ($i = 2$);
- производительность элементов $C_i = 60$ ($i = 1, 3 \div 5$), $C_i = 40$ ($i = 2$).

Расчет, выполняемый в Relex RBD, строится на следующих предположениях:

- рассматриваются потоковая (flow network) и электрическая (electricity network) модель сети;
- потоки на входе переходника (junction) суммируются;
- поток на i -ом выходе переходника равен входному потоку, деленному на число выходов, в случае потоковой сети;
- поток на i -ом выходе переходника равен входному потоку в случае электрической сети;
- суммарный поток на входе/выходе переходника не может превышать 100%.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.5.1

Таблица 2.5.1.

	Производительность в точке 10000ч	Усредненная производительность на интервале (0÷10000ч)	Вероятность заставить систему в момент времени $t=10000\text{ч}$ на уровне производительности = 100%	Вероятность заставить систему в момент времени $t=10000\text{ч}$ на уровне производительности $60\% \leq C \leq 100\%$
Потоковая сеть	21.6	51.1	0.0215	0.12
Электрическая сеть	45.2	75.6	0.217	0.497

2.5.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

Методы решения задач этого класса в технологии и ПК АСМ в настоящее время не реализованы.

2.5.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

Методы решения задач этого класса в технологии Risk Spectrum в настоящее время не реализованы.

Сводная таблица результатов раздела 2.5. " Расчет производительности (пропускной способности) системы "					
Примеры элементов	Характеристики задачи	Результаты моделирования и расчетов			
		Relex RBD	ПК АСМ	Risk Spectrum	
1	2	3	4	5	
<p>Средняя наработка до отказа элементов: $T_i = 12500\text{ч}$ ($i = 1,3 \div 5$), $T_i = 15625\text{ч}$ ($i=2$);</p> <p>Производительность элементов $C_i = 60$ ($i = 1,3 \div 5$), $C_i = 40$ ($i = 2$).</p>	Потоковая сеть	Производительность в точке 10000ч	21.6	не вычисляются	
		Усредненная производительность на интервале (0÷10000ч)	51.1		
		Вероятность заставить систему в момент времени $t=10000\text{ч}$ на уровне производительности = 100%	0.0215		
		Вероятность заставить систему в момент времени $t=10000\text{ч}$ на уровне производительности $60\% \leq C \leq 100\%$	0.12		
	Электрическая сеть	Производительность в точке 10000ч	45.2		не вычисляются
		Усредненная производительность на интервале (0÷10000ч)	75.6		
		Вероятность заставить систему в момент времени $t=10000\text{ч}$ на уровне производительности = 100%	0.217		
		Вероятность заставить систему в момент времени $t=10000\text{ч}$ на уровне производительности $60\% \leq C \leq 100\%$	0.497		

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.5

Выводы специалистов ИПУ РАН

Задачи с производительностью решены только на ПК Relex.

Выводы специалистов ОАО «СПИК СЗМА»

В настоящее время данный, очень полезный класс задач в технологии и ПК АСМ не разработан. Мы четко представляем, как реализовать автоматизированное решение задач данного вида в ОЛВМ, технологии и ПК АСМ и планируем проведение соответствующей доработки нашего программного комплекса.

Выводы специалистов СПБАЭП

Решение задач данного класса обеспечивает только ПК Relex. Учитывая практическую важность подобных задач, следует рекомендовать доработку ПК АСМ и Risk Spectrum в данном направлении.

2.6. Фазовые диаграммы

2.6.1. Описание задачи

Фазовые диаграммы предназначены для моделирования успешного выполнения задания, состоящего из нескольких последовательных во времени фаз, в каждой из которых может использоваться одно и то же оборудование, соединенное в различные структурные схемы надежности, и имеющее, возможно, различные характеристики надежности. Эти характеристики определяются режимом работы оборудования в данной фазе.

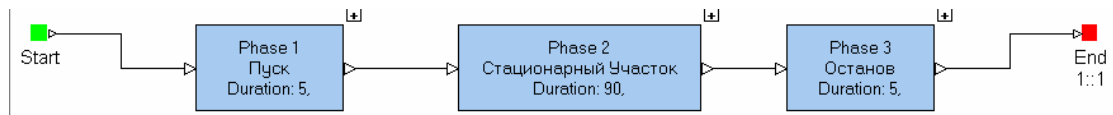
Необходимо рассчитать надежность системы, состоящей из шести компонентов. Для успешной работы системы необходимо успешное выполнение ее назначения в каждой из трех последовательно выполняемых фаз, см. рис. 2.6.1 а. В фазе 1 используются все шесть компонентов, в фазе 2 – четыре компонента (1÷4), в фазе 3 – пять компонентов (1,3,4÷6).

2.6.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

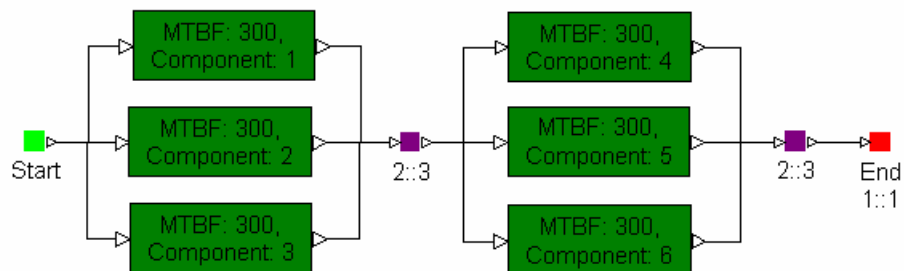
Для решения вышеуказанной задачи предназначено расширение Relex RBD – фазовые диаграммы (Phase Block Diagram – PBD).

На рис. 2.6.1.а приведена фазовая диаграмма, состоящая из 3-х фаз. На рис. 2.6.1.б-д представлены блок-схемы надежности каждой из фаз соответственно.

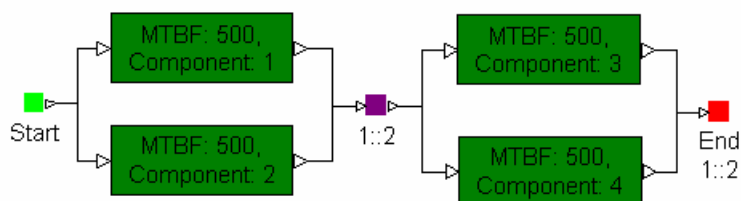
Вся систем состоит из 6 компонентов.



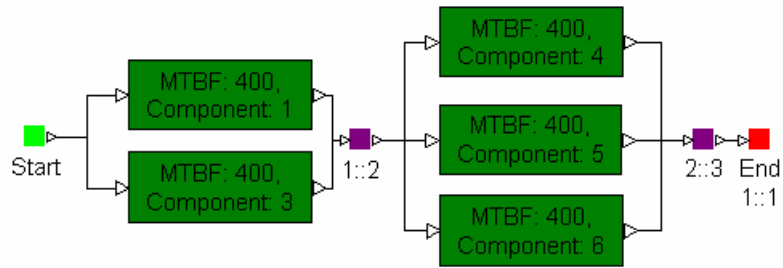
а). Три фазы выполнения задания



б). Блок-схема надежности фазы 1



в). Блок-схема надежности фазы 2



d). Блок-схема надежности фазы 3

Рис. 2.6.1. Фазовая диаграмма

Расчет проведен для следующих исходных данных:

- средняя наработка до отказа элементов в фазе 1: $T_i=300\text{ч}$ ($I=1 \div 6$);
- средняя наработка до отказа элементов в фазе 2: $T_i=500\text{ч}$ ($I=1 \div 4$);
- средняя наработка до отказа элементов в фазе 3: $T_i=400\text{ч}$ ($I=1, 3, 4 \div 6$).

Результаты расчета представлены в таблице 2.6.1

Таблица 2.6.1.

Фаза	Длительность	Интегральное время	Вероятность успешного выполнения задания на конец фазы
1	5	5	0.998380
2	90	95	0.936214
3	5	100	0.779638

2.6.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

Методы точного решения задач этого класса в технологии и ПК АСМ в настоящее время не разработаны и не реализованы.

Мы повторили на ПК АСМ СЗМА решение данного примера по методике предложенной специалистами СПбАЭП и получили следующие результаты:

1. первая фаза – **0.998379**;
2. вторая фаза – **0.939485**;
3. третья фаза – **0.781702**.

Эти результаты внешне близки к данным, полученным с помощью ПК Relex RBD фазовые диаграммы (см. табл.2.6.1) и ПК Risk Spectrum (см. вторую часть табл.2). Однако специалисты СПИК СЗМА после изучения существа данной задачи и полученных результатов моделирования на разных ПК пришли к заключению, что методика, предложенная специалистами СПбАЭП, является совершенно некорректной. Примерно одинаковые результаты расчетов в данном примере являются, по нашему мнению, только частным случаем. Поэтому мы не поместили в сводную таблицу результатов решения этой задачи на ПК АСМ СЗМА.

2.6.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

Деревья отказов для фазовой диаграммы представлены на рис. 2.6.2.

Расчет проведен для следующих исходных данных:

- средняя наработка до отказа элементов в фазе 1: $T_i=300\text{ч}$ ($i=1 \div 6$);
- средняя наработка до отказа элементов в фазе 2: $T_i=500\text{ч}$ ($i=1 \div 4$);
- средняя наработка до отказа элементов в фазе 3: $T_i=400\text{ч}$ ($i=1, 3, 4 \div 6$).

Результаты расчета представлены в таблице 2.6.2

Таблица 2.6.2.

Фаза	Длительность	Интегральное время	Вероятность успешного выполнения задания на конец фазы
1	5	5	0.998394
2	90	95	0.94494
3	5	100	0.94436

Поскольку результаты расчетов вероятности успешного выполнения задания 2 и 3 фаз ПК Risk Spectrum существенно отличаются от аналогичных результатов расчетов ПК "Relex" (**0.936214 – 2 фаза, 0.779638 – 3 фаза**), то было сделано предположение о неверном вводе длительности выполнения 2 и 3 фаз специалистами "Relex" (вместо реального времени длительности фаз 2 и 3 было подставлено интегральное время). Были проделаны аналогичные расчеты для 2 и 3 фаз, но с временем длительности выполнения 2 фазы – 95 часов, а времени длительности выполнения 3 фазы – 100 часов, при неизменной длительности выполнения 1 фазы – 5 часов. Как видно, из представленных ниже расчетов, результаты по обоим ПК существенно сблизились.

Результаты расчетов.

Фаза	Длительность	Интегральное время	Вероятность успешного выполнения задания на конец фазы
1	5	5	0.998394
2	90	95	0.939
3	5	100	0.769

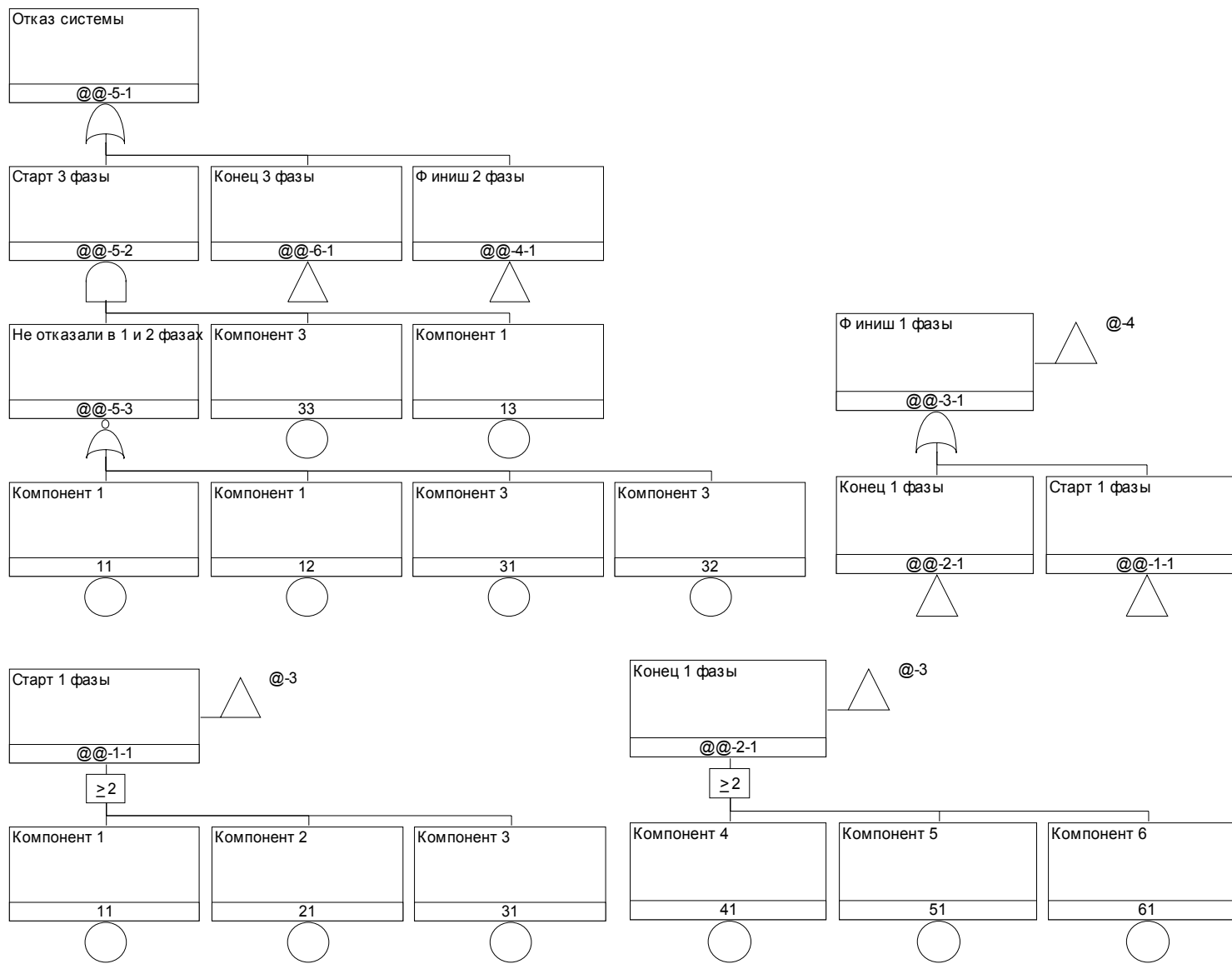


Рис. 2.6.2. Дерево отказов для фазовой диаграммы (начало)

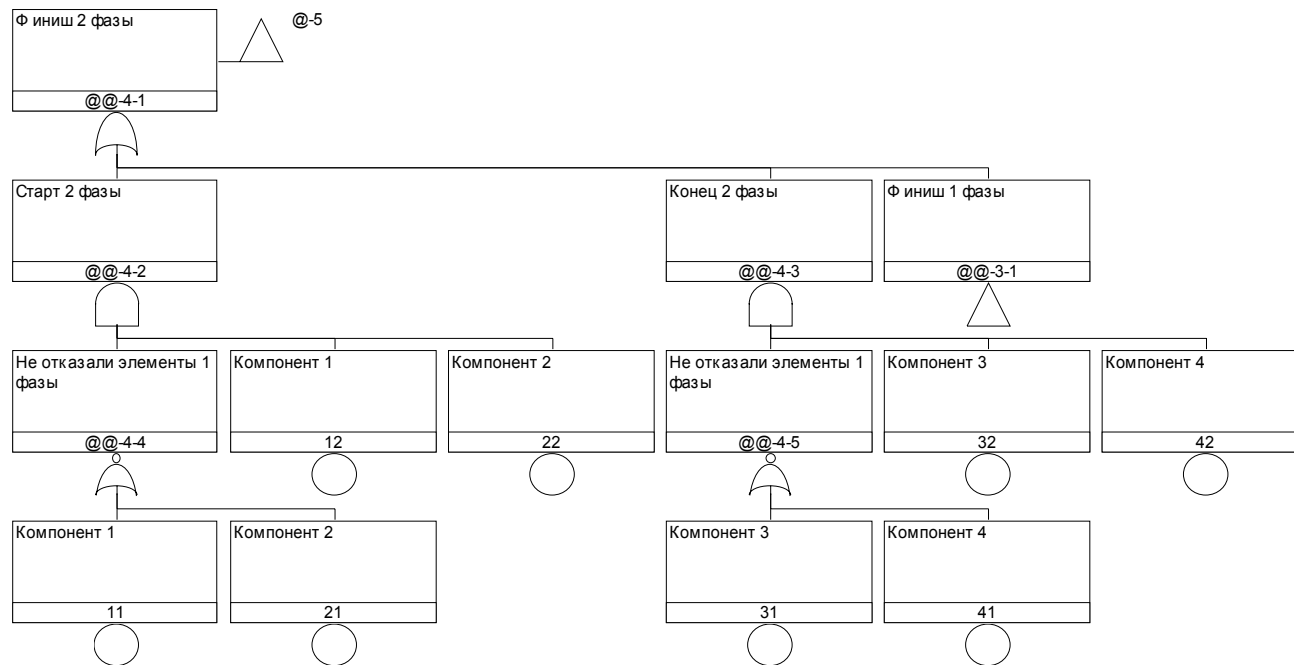


Рис. 2.6.2. Дерево отказов для фазовой диаграммы (продолжение)

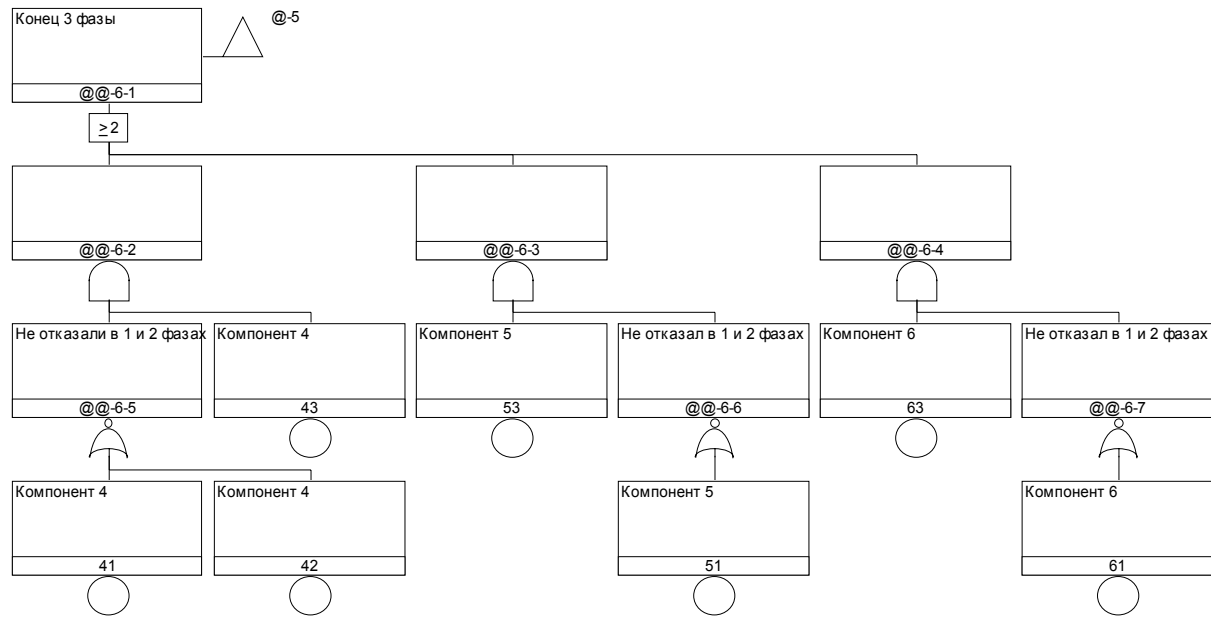


Рис. 2.6.2. Дерево отказов для фазовой диаграммы (конец)

Сводная таблица результатов раздела 2.6. " Фазовые диаграммы "				
Примеры элементов	Характеристики задачи	Результаты моделирования и расчетов		
		Relex Phase Block Diagram	ПК АСМ	Risk Spectrum
1	2	3	4	5
Фаза 1: $T_i=300$ч ($I=1 \div 6$); Фаза 2: $T_i=500$ч ($I=1 \div 4$); Фаза 3: $T_i=400$ч ($I=1, 3, 4 \div 6$).	Вероятность успешного выполнения задания на конец фазы 1	0.998380	не вычисляются	0.998394
	Вероятность успешного выполнения задания на конец фазы 2	0.936214		0.939
	Вероятность успешного выполнения задания на конец фазы 3	0.779638		0.769

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.6

Выводы специалистов ИПУ РАН

Предложенные решения специалистами СПБАЭП неверны (как независимое перемножение результатов расчетов для каждой фазы, так и с интегральным временем). Особенностью этой задачи является нахождение всех возможных распределений на начало каждой фазы и свертка найденных вероятностей успешного окончания фазы с учетом распределений на начало фазы.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Задачи данного класса представляются практически важными и перспективными. Поэтому в СПИК СЗМА планируются исследования по этой теме, направленные на разработку методов их автоматизированного решения и реализации в технологии и ПК АСМ.
2. Мы выражаем сомнение в научной корректности методики решения задач данного класса, предложенной специалистами СПБАЭП.

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Решение задач данного класса обеспечивают только ПК Relex и Risk Spectrum. Однако, не смотря на то, что специалисты СПИК СЗМА не смогли решить рассматриваемую задачу, анализ способов ее решения с помощью других кодов показывает, что она может быть решена и с помощью ПК АСМ. Специалистам СПИК СЗМА необходимо продолжить исследования в данном направлении.

2. Не смотря на то, что с помощью ПК Risk Spectrum данная задача была решена, необходимо отметить, что графическая модель фазовой диаграммы для данного примера значительно сложнее графической модели, построенной в ПК Relex.

2.7. Расчет безопасности участка железной дороги

2.7.1. Описание задачи

На рис. 2.7.1 приведена функциональная схема участка железной дороги (ж.д.), для которой требуется построить математическую модель и рассчитать вероятностные показатели ее безопасности, аварии и риска функционирования.



Рис. 2.7.1. Схема участка железной дороги

В рассматриваемом примере предусматривается учет двух исходных причин возможной аварии - излом рельса и/или возникновение предмета на рельсах. Если произошли события излома рельса и безотказной работы системы индикации излома рельса, то зеленый разрешающий сигнал светофора изменяется на запрещающий красный сигнал. Если машинист не допустит ошибки и увидит предмет на рельсах и/или красный сигнал светофора, то он включит систему торможения поезда. Тогда, при условии безотказной работы системы торможения, ж.д. авария будет предотвращена.

Требуется построить модели и рассчитать вероятностные характеристики безопасного функционирования участка железной дороги и возникновения аварии. Также требуется определить значимости и вклады каждого отдельного элемента (излом рельса, предмет на рельсах, индикатор излома, машинист, тормозная система) в показатель безопасности рассматриваемого участка ж.д.

2.7.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Дерево безопасности участка железной дороги набранное в редакторе задания модели Relex Fault Tree, приведено на рис. 2.7.2. На рис. 27.3 приведено дерево аварии.

Расчет проведен при следующих исходных данных:

- вероятность исправного состояния рельса $P_1=0.9$;
- вероятность отсутствия предмета на рельсах $P_2= 0.9$;
- вероятность правильных действий человека $P_4= 0.999$;
- вероятность исправного состояния тормозов $P_5= 0.999$;
- вероятность безотказной работы светофора $P_3= 0.9$.

В результате расчета получены:

- вероятность отсутствия аварии $P_{\text{безопасности}} = 0.990638$,
- вероятность возникновения аварии $P_{\text{аварии}} = 0.00936182$.

Проведен также расчет при других исходных данных. Результат - в сводной таблице.

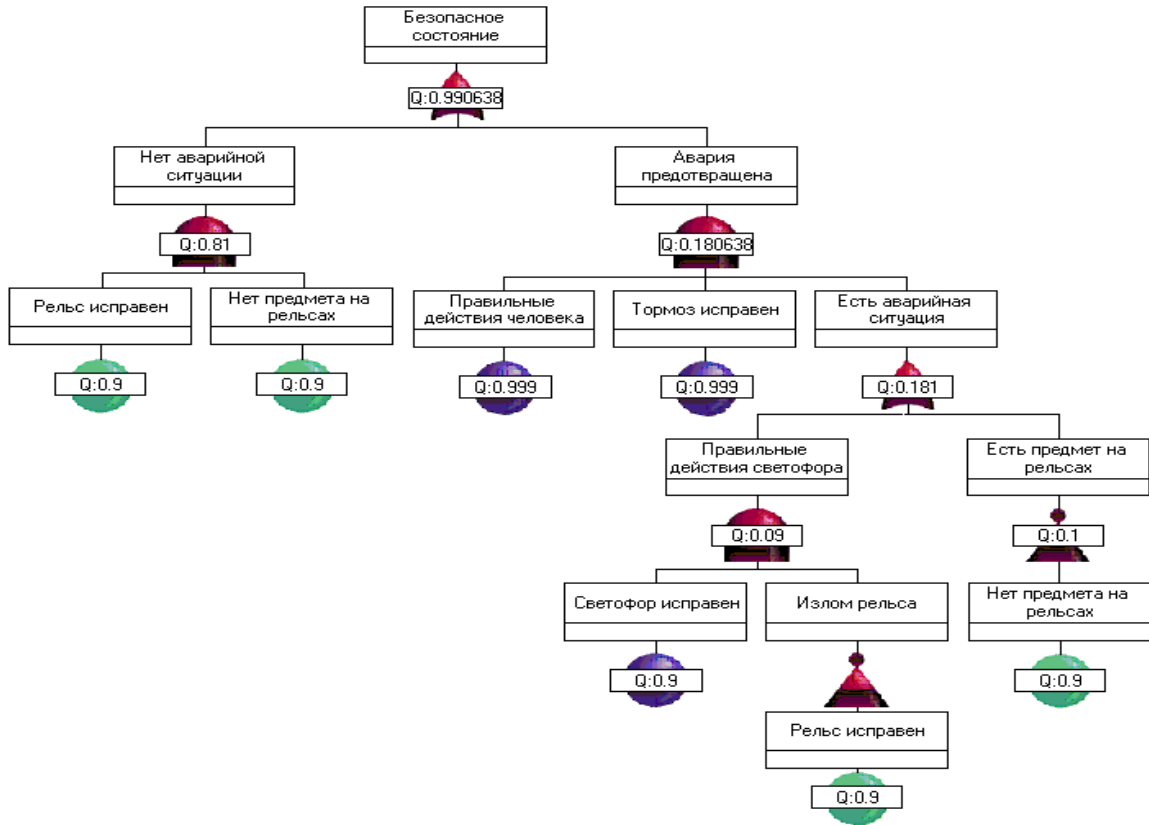


Рис. 2.7.2. Дерево безопасности участка жд, набранное в редакторе Relex Fault Tree

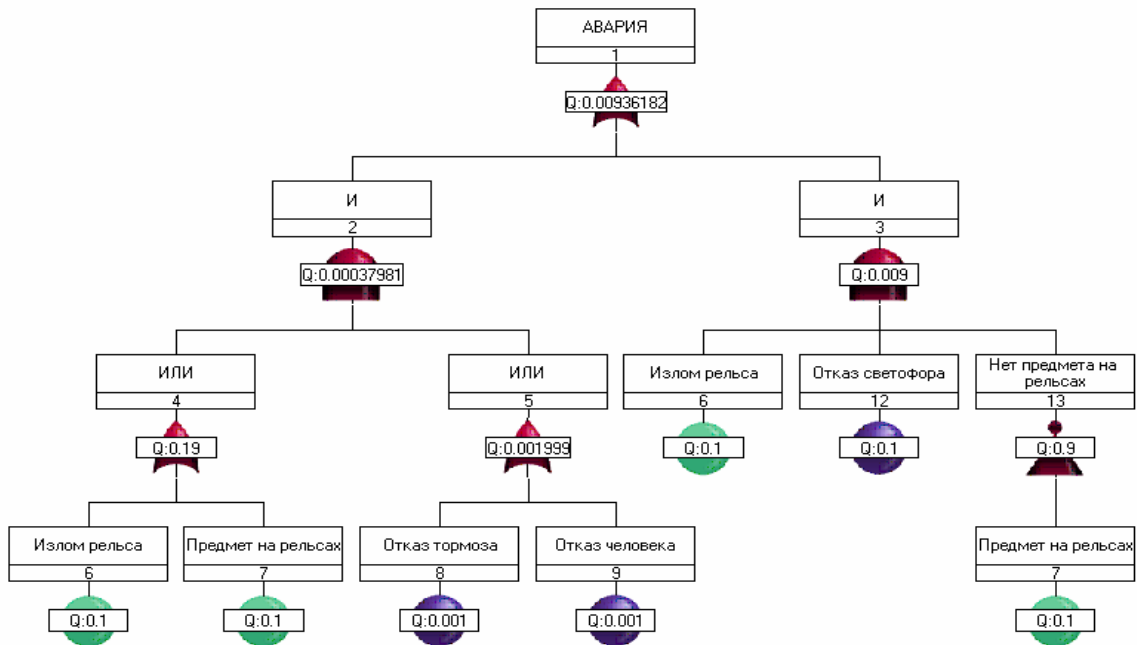


Рис. 2.7.3. Дерево аварии участка железной дороги, набранное в редакторе Relex Fault Tree

2.7.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

На примере решения данной задачи проиллюстрируем более детально, чем ранее, содержание методики постановки задач и построения СФЦ, которая используется в общем логико-вероятностном методе технологии автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования сложных систем.

1. Определение элементов структурной модели

В целях построения СФЦ рассматриваемой системы (см. рис. 2.7.1) можно выделить пять элементов $i = 1, 2, \dots, 5$, которые представляются бинарными событиями и с достаточной, по мнению разработчика, точностью характеризуют безопасность данного участка ж.д. Состав бинарных элементов и заданные их вероятностные параметры приведены на рис.2.7.4.

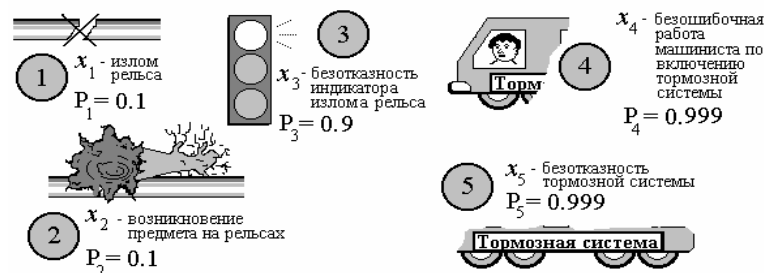


Рис.2.7.4. Состав бинарных элементов для модели безопасности участка железной дороги

Здесь события излома рельса (1) и возникновение предмета на рельсах (2) относятся к инициирующим событиям возможной аварии на рассматриваемом участке ж.д. События безотказной работы индикатора излома рельса (3), тормозной системы (5) и безошибочности действий машиниста (4) определяют безотказность системы обеспечения безопасности на данном участке ж.д.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СФЦ НА ОСНОВЕ ПРЯМОЙ ЛОГИКИ РАССУЖДЕНИЙ

Все выделенные бинарные события системы в СФЦ представляются функциональными вершинами, с номерами $i = 1, 2, \dots, 5$. В логической модели они обозначаются простыми логическими переменными $\bar{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$, а в вероятностной модели - собственными вероятностными параметрами $p_i, q_i = 1 - p_i$ реализации, соответственно, прямого x_i и инверсного \bar{x}_i исходов каждого бинарного события. Для правильного построения СФЦ важно четко определить (и далее не изменять!), смысловое содержание каждого выделенного бинарного события. В рассматриваемом примере все эти данные указаны на рис.2.7.4.

2. Определение выходных функций элементов и условий их реализации в системе

На рис. 2.7.5 приведены графические изображения и краткие содержательные описания выходных функций каждого из пяти бинарных элементов (событий) участка ж.д.

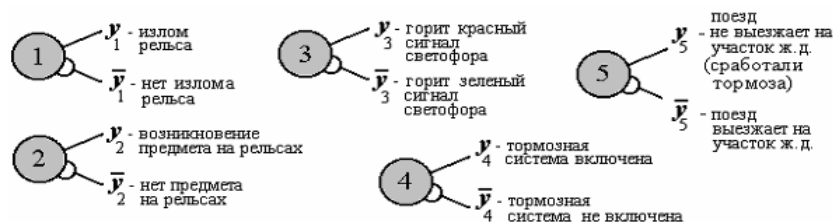


Рис. 2.7.5. Описания выходных функций элементов

3. Логические условия реализации выходных функций элементов

На этом этапе, необходимо определить и графически отобразить логические условия реализации в системе указанных выше выходных функций всех элементов. Фрагментарно эти условия представлены и описаны на рис.2.7.6.

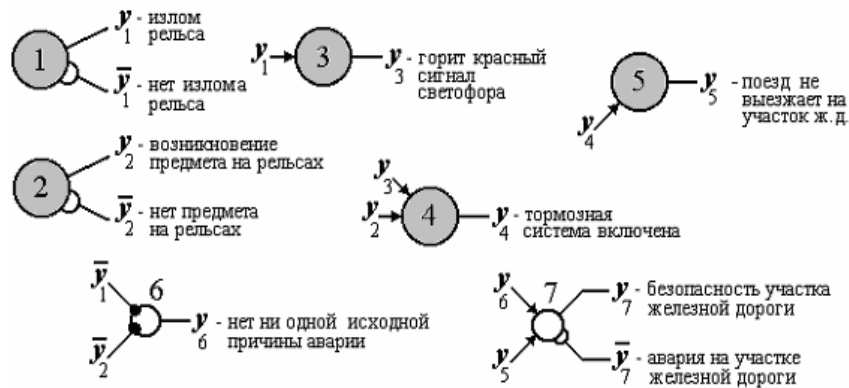


Рис. 2.7.6. Фрагменты условий реализации выходных функций элементов

Определение и графическое представление этих условий основывалось на знании правил функционирования элементов в исследуемой системе в целом (см. рис. 2.7.1), смыслового содержания выделенных бинарных событий (см. рис. 2.7.4), прямых и инверсных выходных функций каждого элемента (см. рис. 2.7.5), а также изобразительных средств СФЦ и базовых логических соотношениях ОЛВМ. Определим смысловое содержание всех фрагментов СФЦ, приведенных на рис.2.19:

1. В формируемой модели не рассматриваются какие либо дополнительные условия возникновения или не возникновения исходных причин \bar{y}_1 и \bar{y}_2 возможной аварии на участке ж.д., кроме свершение или не свершение соответствующих исходных (иницирующих) событий (ИС) аварии x_1 - излом рельса и x_2 и возникновение предмета на рельсах. То есть, эти вершины СФЦ являются головными, поскольку в них не заходит ни одной дуги функционального подчинения.
2. Первым условием, реализации прямой выходной функции y_3 (горит красный сигнал светофора), является безотказная работа всего оборудования индикатора излома рельса x_3 . Вторым, обеспечивающим условием, является наличие (реализация) функции y_1 - возникновения излома рельса на данном участка ж.д.
3. Функция y_4 (включение тормозной системы поезда) непосредственно реализуется при безошибочной работе машиниста x_4 и обеспечивается хотя бы одним из двух условий: или горит красный сигнал светофора - y_3 (есть событие излома рельса), или возник предмет на рельсах - y_2 .
4. Поезд не выезжает на опасный участок железной дороги - y_5 , если тормозная система была своевременно включена машинистом - y_4 и не произошло собственного отказа тормозной системы поезда - x_5 .
5. Для целенаправленного анализа безопасности рассматриваемого участка ж.д. на рис. 2.7.6 с помощью фиктивных вершин 6 и 7 выполнены две группировки интегративных функций. Функция $y_6 = \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2$ определяет отсутствие всех исходных событий (нет излома и нет предмета) аварии. Прямая функция $y_7 = y_6 \vee y_5$ определяет два возможных варианта безопасного функционирования рассматриваемого участка ж.д.: y_6 - реализуется при полном отсутствии ИС (исходных причин аварии), или y_5 - реализуется при условии возникновения хотя бы одного ИС и правильной (штатной)

работы элементов системы безопасности, т.е. иницирующих условий (ИУ) - индикатора излома рельса, машиниста и тормозной системы. Естественно, что полная инверсия этой функции безопасности (\bar{y}_7) должна соответствовать всем возможным вариантам событий, неизбежно приводящим к аварии на рассматриваемом участке железной дороги.

Теперь осталось только объединить все указанные на рис.2.19 фрагменты, и получаем законченную СФЦ структурной модели безопасности исследуемого участка железной дороги.

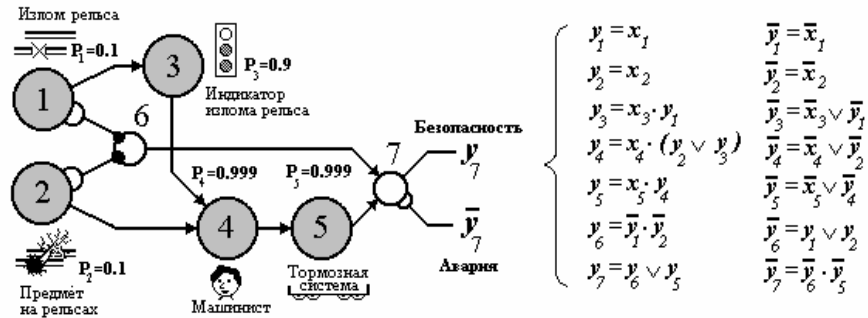


Рис. 2. 7.7. СФЦ безопасности железной дороги

4. Анализ корректности построения СФЦ

Важным завершающим этапом является анализ корректности (полноты, правильности) полученного на третьем этапе варианта СФЦ системы, ее соответствия целям моделирования, особенностям исследуемой системы, принятым ограничениям и допущениям. Это, безусловно, творческий, профессионально ориентированный и, часто, коллегиальный процесс. Однако в какой бы форме не выполнялась указанная работа, всегда могут иметь место следующие три варианта конечного результата.

1. СФЦ признается в достаточной степени корректной, т.е. ее можно использовать для дальнейшего построения расчетных математических моделей и исследования свойств НБР рассматриваемой системы. Тогда построение СФЦ завершается.
2. СФЦ признается недостаточно корректной, но ее можно усовершенствовать. Тогда осуществляется возврат к одному из предыдущих этапов вплоть до изменения исходной формулировки задачи моделирования.
3. СФЦ признается недостаточно корректной и никакое улучшение не позволяет решить поставленную задачу моделирования. Тогда приходится отказаться от применения ОЛВМ и технологии и ПК АСМ и искать какие-либо другие пути решения поставленной задачи. Полезно, однако, исследовать причины такого отказа. Их также можно разделить на три группы. Во-первых, это объективные причины принципиальной невозможности применения методов логико-вероятностного моделирования для решения поставленной задачи. Во-вторых, когда решение задачи логико-вероятностными методами в принципе возможно, но этого не позволяет сделать существующий уровень развития теории ОЛВМ или уровень реализованных в программных комплексах возможностей автоматизированного структурно-логического моделирования. В этом случае открываются перспективы дальнейшего развития данного методологического направления системного анализа. И, в-третьих, бывает, что не удастся построить СФЦ из-за недостаточной теоретической или практической подготовки пользователя. В этом случае полезно обратиться за помощью к более опытным специалистам.

В рассматриваемом примере будем полагать, что изображенная на рис.2.7.7 СФЦ является приемлемым сценарием безопасности и ее можно использовать для построения

расчетных математических моделей и выполнения расчетов характеристик безопасности, аварии и риска функционирования данного участка ж.д.

Построение СФЦ является основной, но не единственной составляющей первого этапа ОЛВМ – формализованной постановки задачи моделирования системы. После построения СФЦ необходимо сформулировать и представить в формализованном виде один или несколько логических критериев функционирования системы (ЛКФ). С помощью ЛКФ в обобщенном виде задается условие реализации системой в целом свойств ее надежности, безопасности или риска. В общем случае ЛКФ в ОЛВМ может задаваться с помощью произвольной логической функции, составленной из обозначений прямых и/или инверсных выходных интегративных функций \bar{y}_i различных функциональных и фиктивных вершин СФЦ. Так, для решения поставленной в рассматриваемом примере задачи расчета вероятности не возникновения аварии, т.е. безопасности участка ж.д., могут быть заданы следующие виды логических критериев:

$$Y_{c1} = y_6 \vee y_5 = y_7 - \text{критерии безопасности участка ж.д.}$$

$$Y_{c2} = \bar{y}_6 \cdot \bar{y}_5 = \bar{y}_7 - \text{критерий возникновения аварии на участке ж.д.}$$

В процессе построения СФЦ, изображенной на рис. 2.7.7, главным было определение и графическое представление условий реализации элементами таких комбинаций выходных функций, которые во всех возможных случаях определяют безопасность рассматриваемого участка ж.д., то есть реализацию системой безопасности своего основного назначения. Такой подход или способ называют построением СФЦ на основе прямой логики рассуждений. Как правило, применение прямой логики рассуждений при построении СФЦ и других структурных моделей (блок-схем, деревьев событий, графов связности) работоспособности или безопасности систем бывает значительно легче, чем построение противоположных структурные модели отказа, аварий, неготовности и т.д. Это обусловлено тем, что специалисты, обычно, лучше знают, как должна правильно функционировать система, и хуже знают условия и комбинации состояний элементов, которые приводят к ее отказу или возникновению аварий. Поэтому применение обратной логики рассуждений при построении структурных моделей отказов или аварий систем, часто бывает затруднительным. Для систем большой размерности и высокой структурной сложности построить правильное дерево отказов часто бывает просто невозможно. Однако следует еще раз подчеркнуть, что логическая универсальность ОЛВМ позволяет реализовать с помощью СФЦ оба указанных подхода, т.е. одинаково корректно представлять как модели работоспособности и безопасности, так и модели их отказа, аварии и риска функционирования. Пользователь имеет возможность выбора прямой или обратной логики рассуждений при построении СФЦ. Это существенно расширяет область практического применения ОЛВМ и технологии АСМ в вероятностном анализе надежности и безопасности систем.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СФЦ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ ЛОГИКИ РАССУЖДЕНИЙ

В качестве примера использования обратной логики рассуждений разработаем с помощью аппарата СФЦ сценарий опасного состояния системы (ОСС), т.е. возникновения (аварии) на рассматриваемом участке ж.д. (см. рис.2.7.5). Для единообразия элементов моделей будем полагать, что состав бинарных событий остается прежним и представлен на рис.2.7.4.

Сначала рассмотрим типичный, для существующей концепции логико-вероятностной теории безопасности, вариант сценария ОСС представленного в виде монотонного дерева отказа. Оно изображено на рис.2.7.8.а.

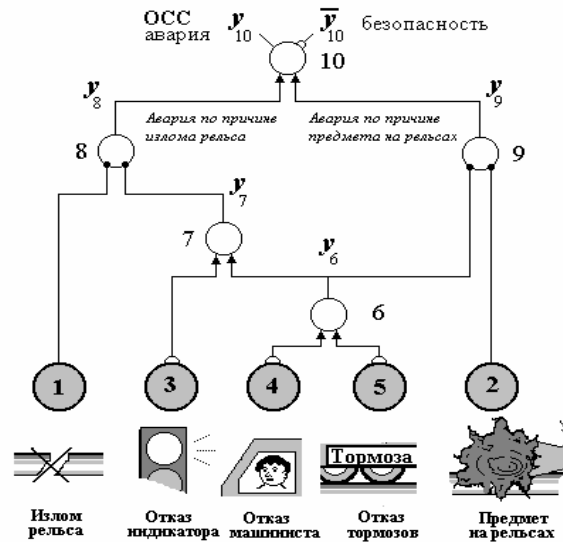


Рис. 2.7.8.а. Монотонный вариант сценария ОСС (дерева отказа) участка ж.д.

Для построения дерева отказа данного сценария необходимо было мысленно перебрать все возможные комбинации исходных событий, приводящие к возникновению аварии на рассматриваемом участке ж.д.

На рис. 2.7.8.а. интегративная функция y_8 представляет все условия, когда авария происходит из-за возникновения излома рельса. Здесь наряду с исходным событием излома рельса x_1 обязательными дополнительными условиями являются или отказ индикатора \bar{x}_3 , или отказ машиниста \bar{x}_4 , или отказ тормозной системы \bar{x}_5 , или любая возможная совместная комбинация указанных событий. Функция y_9 представляет все условия, когда авария происходит при возникновении предмета на рельсах x_2 . В этом случае, индикатор излома не влияет на безопасность. Дополнительными условиями, приводящими к аварии, здесь являются только отказ машиниста \bar{x}_4 или/и отказ тормозной системы поезда \bar{x}_5 .

Если предположить, что все указанные варианты возникновения аварии функциями y_8 и y_9 представлены на рис.2.7.8.а правильно и полно, то ОСС (авария) участка ж.д. в целом будет представляться выходной интегративной функцией y_{10} , которая реализуется при возникновении хотя бы одной из функций или y_8 , или y_9 , или обеих вместе.

Однако, при реализации обратной логики рассуждений и построении средствами СФЦ дерева отказов, приведенного на рис. 2.7.8.а, была допущена одна, не сразу очевидная ошибка. В приведенных выше рассуждениях и схеме и на рис. 2.7.8.а оказалась неправильно учтена следующая комбинация исходных событий

$$x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5.$$

Согласно рис. 2.7.8.а, эта комбинация отнесена к ОСС, т.е. к аварии на рассматриваемом участке ж.д. Но это не так. Указанная комбинация исходных событий говорит, что, во-первых, произошел излом рельса (x_1), который машинист сам не может видеть. Во-вторых, отказал индикатор излома рельса (\bar{x}_3), т.е. продолжает гореть зеленый разрешающий сигнал светофора. В-третьих, есть опасный предмет на рельсах (x_2). В-четвертых, машинист увидел опасный предмет и своевременно включил тормозную систему (x_4). И в-пятых, тормозная система не отказала (x_5). Следовательно, аварии не произошло.

Здесь, опасность, вызванная отказом индикатора излома рельса, удачно компенсируется другой опасностью - возникновением предмета на рельсах, которая в данных условиях (высокая надежность машиниста и тормозной системы) оказывает не отрицательное, а положительное влияние на безопасность участка ж.д. В монотонной структурной схеме дерева отказов на рис. 2.7.8.а указанная немонотонная зависимость событий не учтена (пропущена). Подобные ситуации в монотонных структурах (блок-схемах и графах связности) вообще не могут быть учтены, поскольку эти графы полностью лишены возможности представления инверсий.

Исправить указанную ошибку структурного моделирования можно только используя в СФЦ дерева отказов дополнительные инверсные связи функционального подчинения. Вариант такой правильной схемы функциональной целостности, представляющей немонотонное дерево отказов сценария ОСС рассматриваемого участка ж.д., приведен на рис. 2.7.8.б.

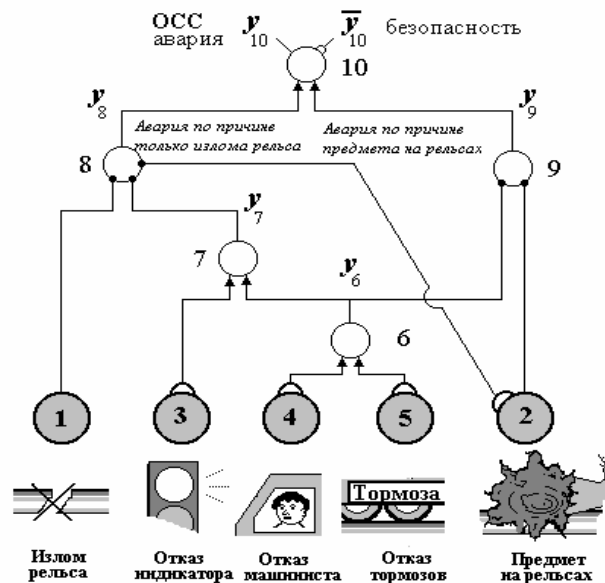


Рис. 2.7.8.б. Правильный вариант СФЦ дерева отказа (ОСС) участка ж.д.

На этой схеме, условие реализации функции y_8 (возникновение аварии вследствие излома рельса) дополнено еще одним обязательным условием \bar{y}_2 (отсутствие предмета на рельсах).

Разработать СФЦ сценария ОСС (рис. 2.7.8.б), даже в таком простом примере, оказалось сложнее, чем построить СФЦ сценария ее безопасного функционирования (рис.2.7.7).

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ НА ПК АСМ

Общая методика использования всех версий ПК АСМ характеризуется следующей последовательностью действий.

1. Разработанная СФЦ с помощью графического редактора вводится в ПК АСМ. В ПК АСМ выполняется автоматическое преобразование графа СФЦ в соответствующую систему логических уравнений в функционально полном базисе логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ".
2. Вводятся значения вероятностных и других параметров элементов и режимов автоматизированного моделирования.

3. Задается логический критерий исследуемого режима функционирования исследуемой системы. ЛКФ может представлять любое логическое условие (монотонное и немонотонное) работоспособности, отказа, безопасности, аварии, эффективности или риска функционирования системы.
4. Включается сеанс моделирования, в процессе которого ПК АСМ выполняет автоматическое построение логической функции работоспособности системы (монотонной и немонотонной), формирует точный многочлен расчетной вероятностной функции и выполняет расчеты вероятностных и ряда других системных показателей.
5. Исходные данные задачи и результаты автоматизированного моделирования и расчетов выводятся на экран монитора и сохраняются в файле результатов и/или базе данных проектов.

Логическая универсальность ОЛВМ и ПК АСМ позволяют средствами СФЦ представлять все основные виды логически строгих структурных схем систем, используемых в других технологиях автоматизированного моделирования (блок-схемы, деревья отказов, деревья событий, графы связности и др.). На основе любой формы представления структурной модели системы средствами СФЦ в ПК АСМ могут решаться все виды задач логико-вероятностного моделирования – прямые (работоспособность, готовность, живучесть, безопасность и т.п.), обратные (отказ, неготовность, потеря живучести, авария и т.п.), а также различные их немонотонные комбинации.

Проиллюстрируем сказанное различными вариантами решения рассматриваемого примера с помощью ПК АСМ.

1. Выполним с помощью ПК АСМ СЗМА автоматизированное моделирование и расчет безопасности рассматриваемого участка ж.д. на основе СФЦ, изображенной на рис.2.7.7, задав ЛКФ $Y_C = y_7$ (отсутствие аварии). Результаты приведены на рисунке 2.7.9.

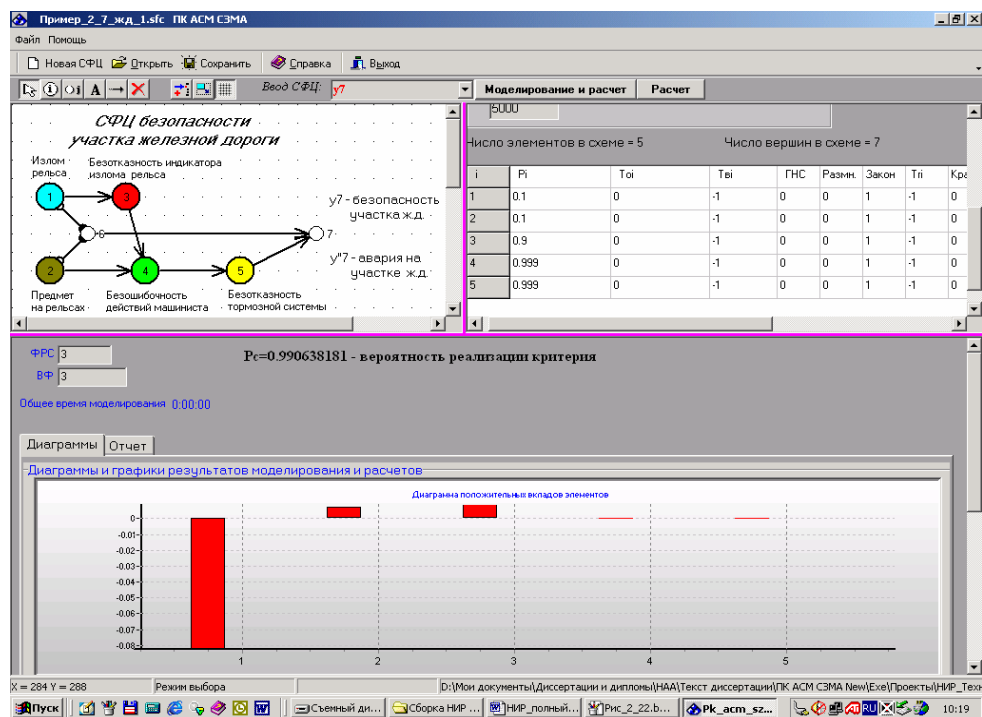


Рис. 2.7.9. Результаты моделирования и расчета безопасности

Полученная вероятность отсутствия аварии на рассматриваемом участке ж.д. составила $P_{\text{безопасности}} = 0.990638181$, что точно совпадает с результатом решения этой задачи, полученным с помощью модуля деревьев отказов Relex Fault Tree. Для полу-

чения этого результата с помощью Relex Fault Tree было использовано дерево безопасности участка ж.д., приведенное на рис.2.7.2.

Из приведенной на рисунке 2.7.8 диаграммы положительных вкладов элементов следует, что наибольшую опасность представляет событие излома рельса, а увеличение вероятности возникновения предмета на рельсах не уменьшает, а увеличивает безопасности на данном участке ж.д.

2. На основе той же СФЦ, изображенной на рис.2.7.7, изменяя только ЛКФ $Y_c = y7$ (отсутствие аварии) на противоположный $Y_c = \bar{y}7 = y^{*}7$ (возникновение аварии) ПК АСМ СЗМА выполняет моделирование и оценку вероятности возникновения аварии на рассматриваемом участке ж.д. Результаты приведены на рисунке 2.7.10.

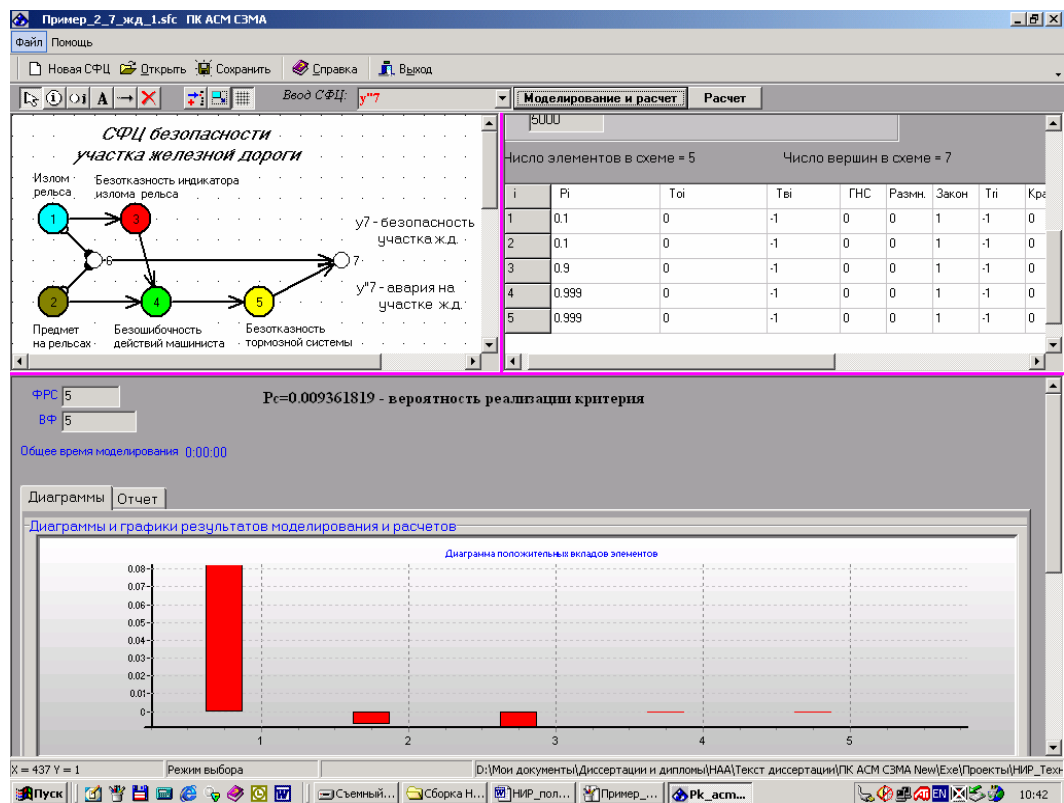


Рис. 2.7.10. Результаты моделирования и расчета опасности

Полученная вероятность возникновения аварии на рассматриваемом участке ж.д. составила $P_{\text{безопасности}} = 0.009361819$, что точно совпадает с результатом решения этой задачи, полученным с помощью модуля деревьев отказов Relex Fault Tree. Для получения этого результата с помощью Relex Fault Tree потребовалось построение другого дерева аварии участка ж.д., приведенного на рис. 2.7.3.

3. Выполним с помощью ПК АСМ СЗМА автоматизированное моделирование и расчет безопасности рассматриваемого участка ж.д. на основе СФЦ правильного дерева отказа, изображенной на рис. 2.7.8.б, задав ЛКФ $Y_c = y10$ (возникновение аварии). Результаты приведены на рисунке 2.7.11.

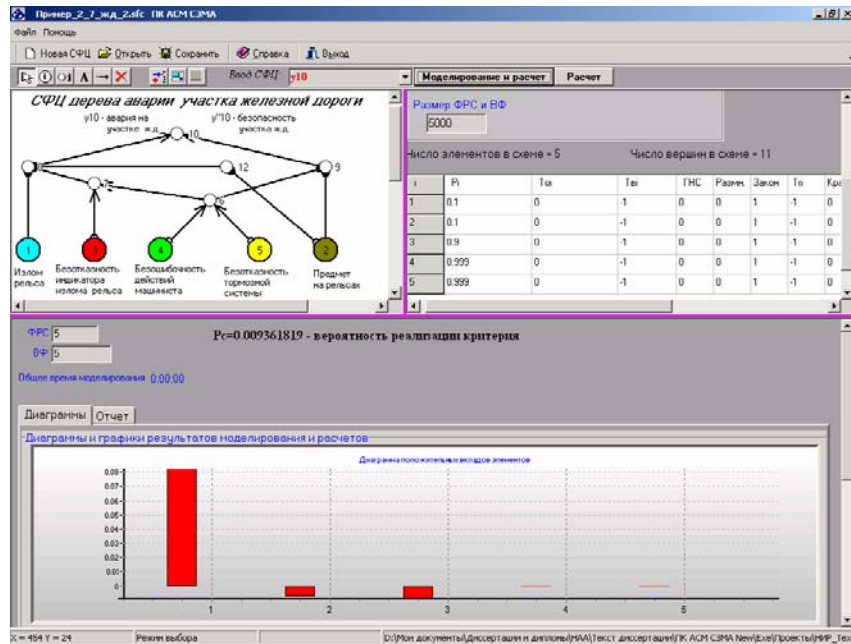


Рис. 2.7.11. Результаты расчетов на основе правильного дерева отказов

Полученная на основе СФЦ дерева аварии вероятность возникновения аварии на рассматриваемом участке ж.д. составила $P_{\text{безопасности}} = 0.009361819$, что точно совпадает с предыдущими результатами.

4. На основе той же СФЦ дерева аварии, изображенной на рис. 27.8.б, изменяя только ЛКФ $Y_C = y10$ (возникновение аварии) на противоположный $Y_C = \bar{y}10 = y^{*}10$ (отсутствия аварии) ПК АСМ СЗМА выполняет моделирование и оценку безопасности рассматриваемого участка ж.д.. Результаты приведены на рисунке 2.7.12.
- 5.

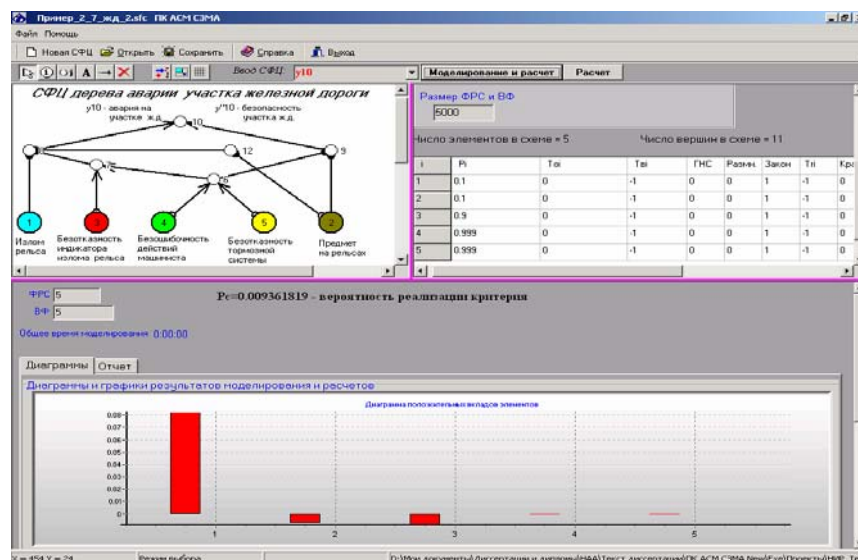


Рис. 2.7.12. Результаты расчета вероятности отсутствия аварии

Полученная на основе СФЦ дерева аварии вероятность не возникновения аварии (безопасности) на рассматриваемом участке ж.д. составила $P_{\text{безопасности}} = 0.009361819$, что точно совпадает с предыдущими результатами.

6. Выполним моделирование и расчет вероятности безопасности участка ж.д. на основе СФЦ, представляющей дерево безопасности Relex Fault Tree, изображенного на рис. 2.7.2. Результаты приведены на 2.7.13.

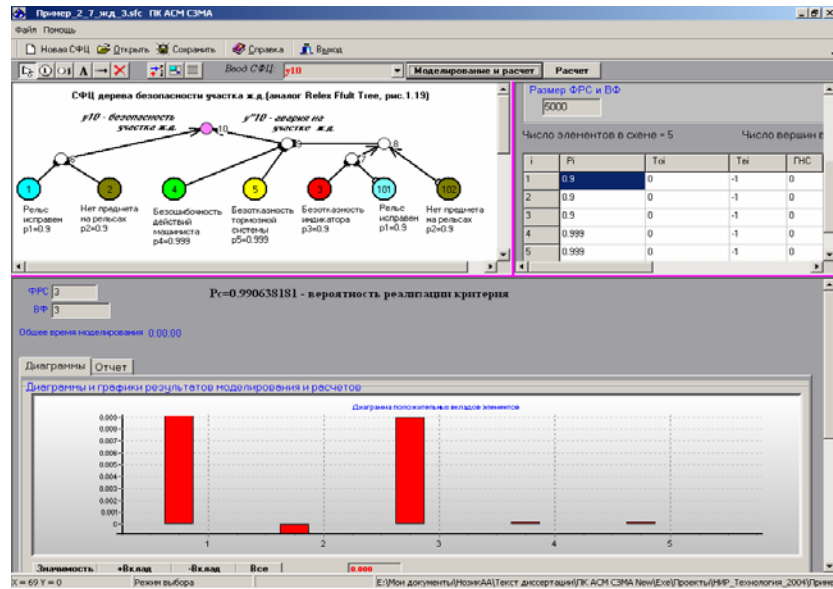


Рис. 2.7.13. Результаты расчетов на основе СФЦ дерева безопасности

7. Выполним моделирование и расчет вероятности аварии участка ж.д. на основе СФЦ, представляющей дерево аварии Relex Fault Tree, изображенного на рис. 2.7.3. Результаты приведены на рисунке 2.7.14.

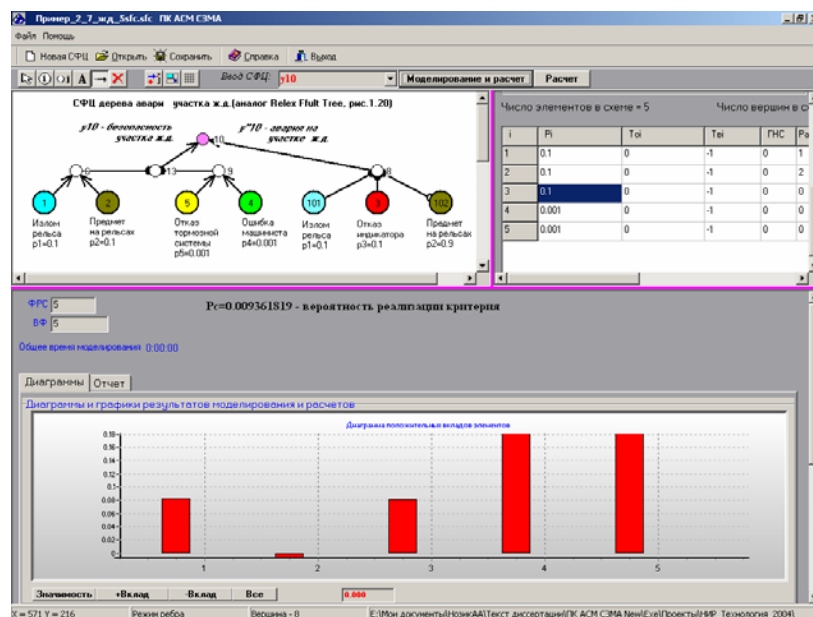


Рис. 2.7.14. Результаты расчетов вероятности аварии по дереву отказов, аналогичному дереву на рис. 2.7.2.

Эти расчеты совпали с ранее полученными результатами (как средствами технологии Relex, так и средствами технологии ACM).

Рассмотренный пример позволяет заключить, что в методическом плане использование аппарата СФЦ технологии ACM во многих случаях является более удобным и эффективным инструментом постановки задач автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности и безопасности систем большой размерности и высокой структурной сложности.

2.7.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

На рис. 2.7.15 представлено дерево отказов для обратной задачи (крушение поезда произошло).

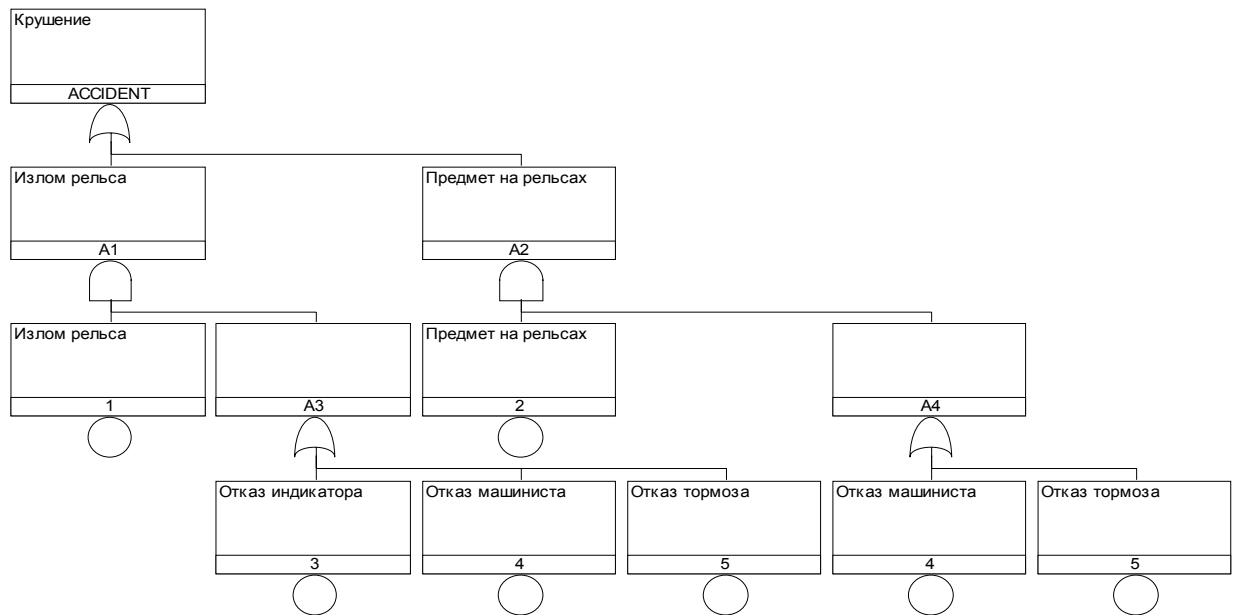


Рис. 2.7.15. Дерево отказов для аварии на участке ж.д.

Вероятности отказов базисных элементов приняты более высокими, чем в предыдущих примерах: $Q_i = 0.0001$.

При решении задачи с помощью ПК «Risk Spectrum» были получены следующие минимальные сечения отказов:

$$2 \times 5 \vee 2 \times 4 \vee 1 \times 5 \vee 1 \times 4 \vee 1 \times 3$$

Рассчитанное значение вероятности свершения аварии равно $5 \text{ E-}08$.

Для проверки результатов моделирования и расчета и их соответствия результатам, полученным с помощью других кодов были произведены расчеты с помощью ПК NEWASM, в основе которого лежит та же технология, что и у кодов ACM 2001 и ACM СЗМА. Расчеты велись по СФЦ, представленной на рис. 2.7.7. Однако в данном случае были заданы более высокие показатели собственной надежности элементов системы, такие же, как при расчетах с помощью ПК «Risk Spectrum». При этом получены следующие результаты:

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПО СФЦ рис. 2.7.7:

Перечень событий в модели

Таблица 2.7.1.

№№ вершины СФЦ	Описание события	Вероятностная характеристика события
1	Рельс неисправен	0.000100
2	Предмет на рельсах	0.000100
3	Индикатор исправен	0.999900
4	Машинист действует правильно	0.999900
5	Тормоза исправны	0.999900

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в минимальной ДНФ)

Логический критерий: $Y_c = \neg x_7$

Размерность ЛФ $K_1=5$ Время построения - 0.00 сек.

$$Y_c = x_2 \cdot \neg x_4 \vee x_2 \cdot \neg x_5 \vee x_1 \cdot \neg x_2 \cdot \neg x_3 \vee x_1 \cdot \neg x_4 \vee x_1 \cdot \neg x_5$$

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в ортогональной ДНФ)

Размерность ВФ $K_{10}=5$ Время построения - 0.00 сек.

$$P_c = p_1 \cdot q_4 + p_1 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_4 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность реализации критерия: 4.9993000400e-08

Вероятность не реализации критерия: 9.9999995001e-01

Таблица характеристик элементов системы

Таблица 2.7.2.

номер эл-та	параметр эл-та	значимость эл-та	вклад $0 \leftarrow p$	вклад $p \rightarrow 1$
1	0.000100	2.999400e-04	-2.999400e-08	2.999100e-04
2	0.000100	1.999600e-04	-1.999600e-08	1.999400e-04
3	0.999900	-9.997000e-05	9.996001e-05	-9.997000e-09
4	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08
5	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08

Как следует из представленных результатов, результаты решения не совпали с результатами, полученными А.С. Можаяевым. Причем не совпали не только результаты расчетов системной характеристики, но и полученные минимальные сечения отказов.

Для выяснения причин несовпадения результатов СФЦ была разработана СФЦ безопасности участка железной дороги, представленная на рис. 2.7.16. Эта СФЦ полностью аналогична инверсированному дереву отказов рис. 2.7.15

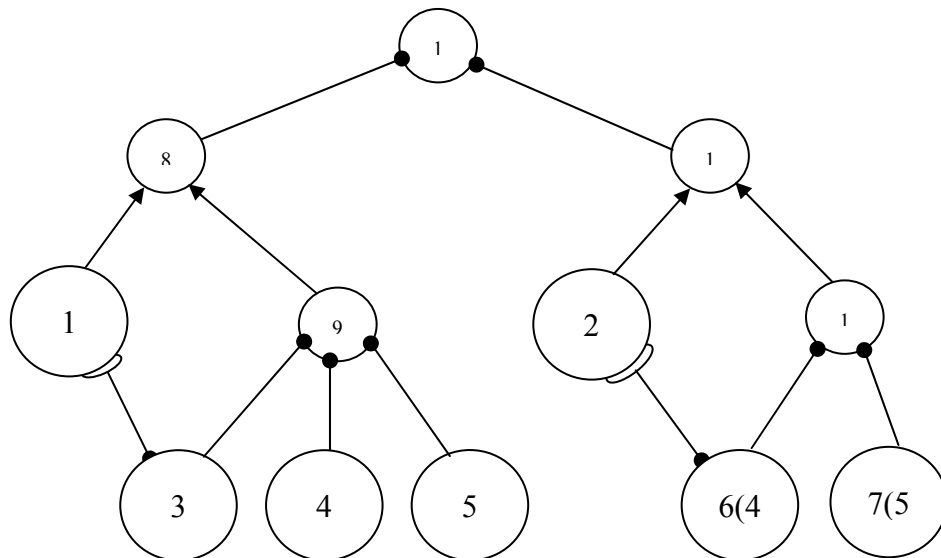


Рис. 2.7.16. СФЦ безопасности участка ж.д.

В таблице 2.7.1 приведено описание элементарных событий, включенных в СФЦ.

Перечень событий в модели

Таблица 2.7.3.

№№ вершины СФЦ	Описание события	Вероятностная характеристика события
1	Рельс исправен	0.999900
2	Предмета на рельсах нет	0.999900
3	Индикатор исправен	0.999900
4	Машинист действует правильно	0.999900
5	Тормоза исправны	0.999900

Как следует из таблицы 2.7.1, здесь допущены два непринципиальных отступления от постановки задачи, данной А.С. Можаяевым:

- вместо события №1 в постановке А.С. Можаяева «Излом рельса» использовано противоположное событие «Рельс исправен»;
- вместо события №2 в постановке А.С. Можаяева «Предмет на рельсах» использовано противоположное событие «Предмета на рельсах нет».

События № 6 и № 7 – размноженные. Шестое соответствует четвертому, а седьмое – пятому.

Ниже приведены результаты решения обратной (произошло крушение поезда) и прямой (крушения не произошло) задач оценки безопасности участка ж.д., выполненного с помощью ПК NEWASM по СФЦ рис. 2.7.16.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПО СФЦ рис. 2.7.16:

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в минимальной ДНФ)

Логический критерий: $Y_c = \neg x_{12}$

Размерность ЛФ $K_1=5$ Время построения - 0.00 сек.

$Y_c = \neg x_2 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_2 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_3$

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в ортогональной ДНФ)

Размерность ВФ $K_{10}=5$ Время построения - 0.00 сек.

$P_c = q_1 * q_3 + q_1 * p_3 * q_4 + p_1 * q_2 * q_4 + q_1 * p_3 * p_4 * q_5 + p_1 * q_2 * p_4 * q_5$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность реализации критерия: 4.9994000200e-08

Вероятность не реализации критерия: 9.9999995001e-01

Таблица характеристик элементов системы

Таблица 2.7.4.

номер эл-та	параметр эл-та	значимость эл-та	вклад 0 <-- p	вклад p --> 1
1	0.999900	-2.999500e-04	2.999200e-04	-2.999500e-08
2	0.999900	-1.999700e-04	1.999500e-04	-1.999700e-08
3	0.999900	-9.998000e-05	9.997000e-05	-9.998000e-09
4	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08
5	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ПО СФЦ рис. 2.7.16:

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в минимальной ДНФ)

Логический критерий: $Y_c = x_{12}$ Размерность ЛФ $K_1=3$ Время построения - 0.00 сек. $Y_c = x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee \neg x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee x_1 \cdot x_2$

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в ортогональной ДНФ)

Размерность ВФ $K_{10}=3$ Время построения - 0.00 сек. $P_c = p_1 \cdot p_2 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность реализации критерия: 9.9999995001e-01

Вероятность не реализации критерия: 4.9994000162e-08

Таблица характеристик элементов системы

Таблица 2.7.5.

номер эл-та	параметр эл-та	значимость эл-та	вклад $0 \leftarrow p$	вклад $p \rightarrow 1$
1	0.999900	2.999500e-04	-2.999200e-04	2.999500e-08
2	0.999900	1.999700e-04	-1.999500e-04	1.999700e-08
3	0.999900	9.998000e-05	-9.997000e-05	9.998000e-09
4	0.999900	1.999600e-04	-1.999400e-04	1.999600e-08
5	0.999900	1.999600e-04	-1.999400e-04	1.999600e-08

Как следует из вышеизложенного, полученные результаты совпали с результатами расчетов по коду «Risk Spectrum» (для обратной задачи) и не совпали с результатами, полученными А.С. Можаяевым.

Из анализа МСО, полученных при решении обратной задачи по обеим СФЦ, было установлено следующее:

На основе СФЦ рис. 2.7.16 получены следующие сечения:

$$Y_c = \neg x_2 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_2 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_3$$

На основе СФЦ рис. 2.7.7 получены такие сечения:

$$Y_c = x_2 \cdot \neg x_4 \vee x_2 \cdot \neg x_5 \vee x_1 \cdot \neg x_2 \cdot \neg x_3 \vee x_1 \cdot \neg x_4 \vee x_1 \cdot \neg x_5$$

Если учесть, что в СФЦ рис. 2.7.16 и СФЦ рис. 2.7.7 события 1 и события 2 противоположны друг другу, то МСО, полученные по СФЦ рис. 2.7.7 переписываются следующим образом:

$$Y_c = \neg x_2 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_2 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_1 \cdot x_2 \cdot \neg x_3 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_5$$

Из последней записи хорошо видно, что в первой СФЦ не учтен тот факт, что событие «Предмет на рельсах» как бы «дублирует» сигнал индикатора. В этом случае машинист, не зная о поломке рельса (вследствие отказа индикатора), останавливает поезд по другому сигналу опасности – «Визуальный образ предмета на рельсах».

В связи с вышесказанным были разработаны две СФЦ, учитывающие данное обстоятельство. СФЦ, изображенная на рис. 2.7.17, подобна СФЦ рис. 2.7.7, но не включает в себя событий, связанных с отказами каких-то элементов, т.е. построена в более строгом соответствии с прямой логикой рассуждений. Для этого события 1 и 2 были заменены на противоположные (1 – рельс исправен, 2 – предмет на рельсах отсутствует). СФЦ, изо-

браженная на рис. 2.7.18, представляет собой откорректированный вариант СФЦ рис. 2.7.16.

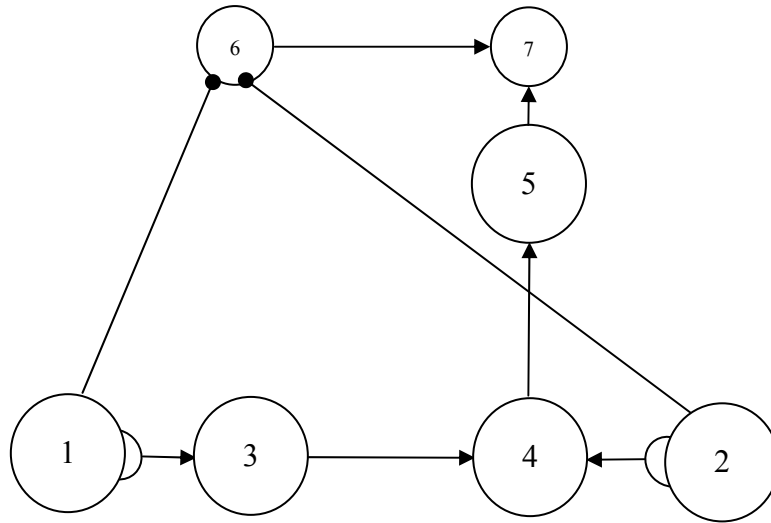


Рис. 2.7.17. СФЦ, построенная с учетом «дублирования» сигналов опасности.

1

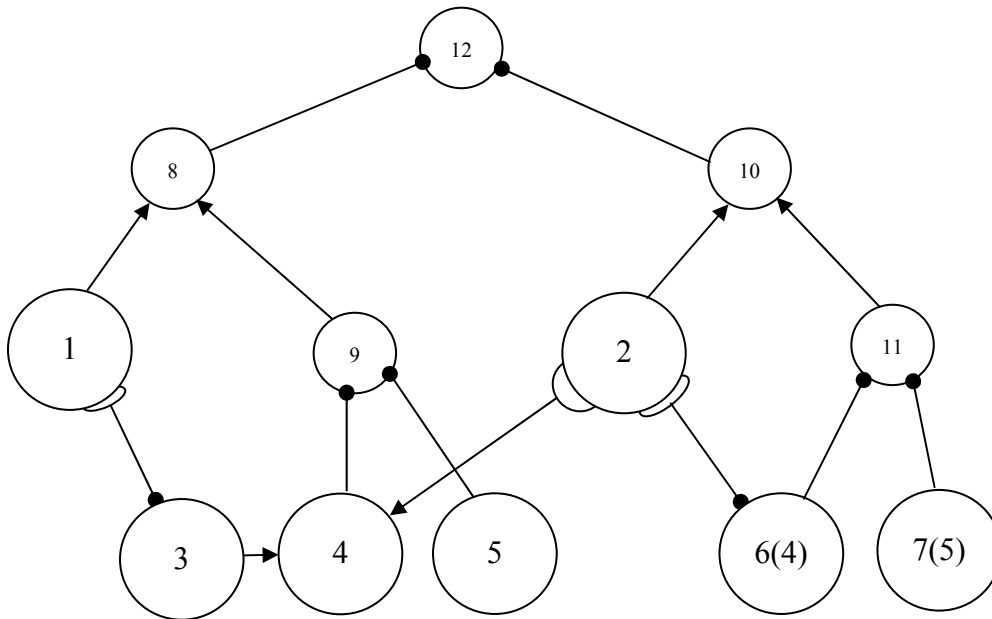


Рис. 2.7.18. СФЦ (рис. 2.7.16), откорректированная с учетом «дублирования» сигналов опасности.

Результаты расчетов по СФЦ 2.7.17 и 2.7.18 полностью совпадают. Ниже представлены результаты расчетов по СФЦ рис. 2.7.18.

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в минимальной ДНФ)

Логический критерий: $Y_c = -x_{12}$

Размерность ЛФ $K_1=5$ Время построения - 0.00 сек.

$Y_c = -x_2 \cdot -x_5 \vee -x_2 \cdot -x_4 \vee -x_1 \cdot -x_5 \vee -x_1 \cdot x_2 \cdot -x_3 \vee -x_1 \cdot -x_4$

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в ортогональной ДНФ)

Размерность ВФ $K_{10}=5$ Время построения - 0.00 сек.

$P_c = q_1 \cdot q_4 + q_1 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_4 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность реализации критерия: 4.9993000400e-08
 Вероятность не реализации критерия: 9.9999995001e-01

Характеристики элементов системы. Таблица 2.7.6.

номер эл-та	параметр эл-та	значимость эл-та	вклад 0 <-- p	вклад p --> 1
1	0.999900	-2.999400e-04	2.999100e-04	-2.999400e-08
2	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08
3	0.999900	-9.997000e-05	9.996001e-05	-9.997000e-09
4	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08
5	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08

Как следует из новых результатов расчета, они полностью совпали с результатами, полученными А.С. Можаяевым.

В соответствии с полученными выводами дерево отказов, рис. 2.7.15 было откорректировано в целях учета дублирования сигналов опасности при одновременном возникновении обоих ИС. Новое дерево представлено на рисунке 2.7.19.

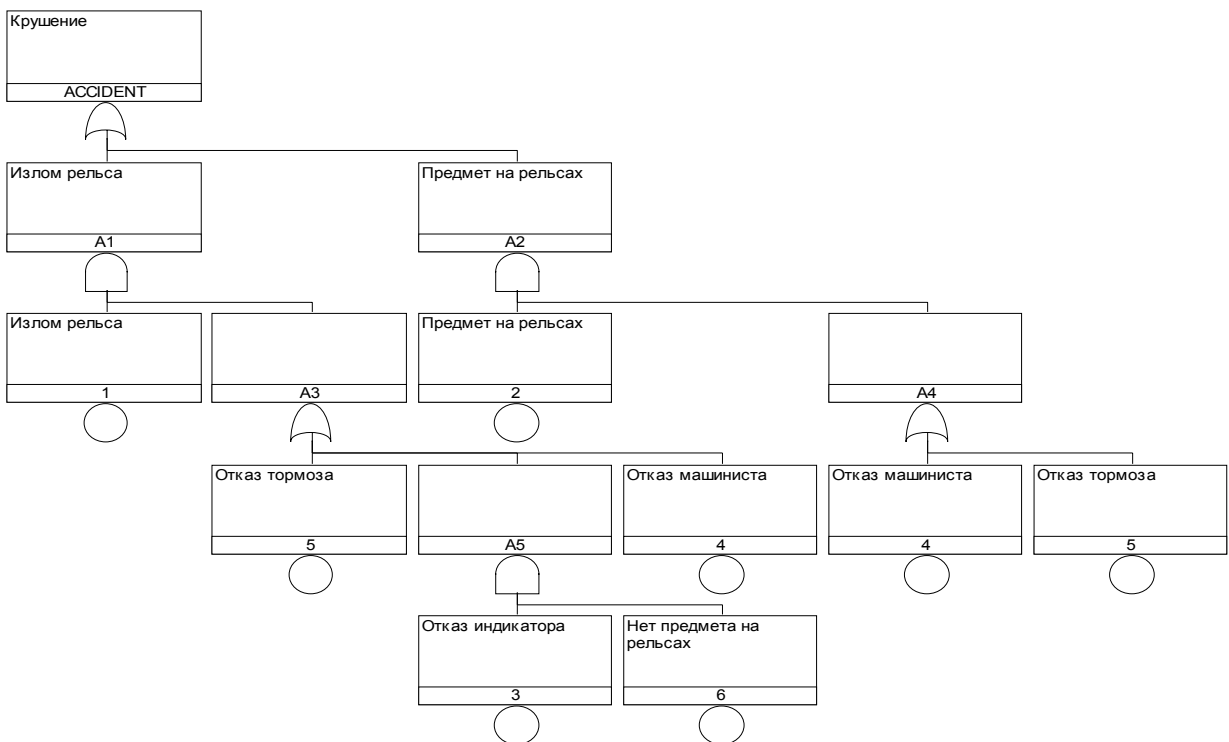


Рис. 2.7.19. Дерево отказов, учитывающее дублирование информации об опасности

Как следует из рис. 2.7.19, дублирование информации учтено введением в дерево отказов нового базисного события №6 «Нет предмета на рельсах». Данному событию была задана вероятность $q_6 = 0.9999$.

Результаты расчетов по дереву рис. 2.7.19 представлены на рис. 2.7.20, полученном путем копирования рабочего окна кода «Risk Spectrum».

Как следует из рис. 2.7.20, результаты расчетов по откорректированному дереву практически совпали с результатами, полученными с помощью других кодов. Совпали

также и все минимальные сечения отказов (с учетом изменения нумерации нового базисного события (№6), введенного в ДО).

В таблице 2.7.7 приведены результаты расчета относительной важности элементов системы.

Таблица 2.7.7.

№№	FV	FC	RDF	RIF	Sens	Sens high	Sens low
1	6.00E-01	6.00E-01	2.50E+00	6.00E+03	1.39E+01	3.20E-07	2.30E-08
2	4.00E-01	4.00E-01	1.67E+00	4.00E+03	7.19E+00	2.30E-07	3.20E-08
5	4.00E-01	4.00E-01	1.67E+00	4.00E+03	7.19E+00	2.30E-07	3.20E-08
4	4.00E-01	4.00E-01	1.67E+00	4.00E+03	7.19E+00	2.30E-07	3.20E-08
6	2.00E-01	2.00E-01	1.25E+00	1.00E+00	1.22E+00	5.00E-08	4.10E-08
3	2.00E-01	2.00E-01	1.25E+00	2.00E+03	3.41E+00	1.40E-07	4.10E-08

Как следует из табл. 2.7.7, относительная важность элементов, рассчитанная с помощью кода «Risk Spectrum», в основном совпадает с результатами, полученными с помощью ПК NEWACM. Однако, как и следовало ожидать, из-за введения в дерево нового базисного элемента изменилась значимость (по Веселы-Фасселу) элемента №3. Имеет значимость и сам элемент №6. Т.о. мы имеем некоторое искажение информации об относительной важности элементов.

Затем с помощью кода «Risk Spectrum» была решена прямая задача, т.е. рассчитана вероятность отсутствия аварии. Для этого дерево рис. 2.7.19 было инверсировано, а все базисные события, входящие в него, заменены на противоположные с соответствующим «инверсированием» собственных вероятностных характеристик. Инверсированное дерево «успеха» представлено на рис. 2.7.21.

После выполнения расчетов были получены следующие результаты:

Минимальные сечения: 1-4-5; 3-4-5; 1-6; 2-4-5

Значение системной характеристики (вероятности отсутствия аварии) при использовании первого порядка аппроксимации составило, 0,998, а при использовании третьего порядка аппроксимации - 0,9906. Т.о. результаты решения прямой задачи практически совпали с результатами, полученными с помощью других кодов.

ID	Description	Calc. type	Mean	5th perc.	Median	95th perc.
ACCIDENT	Крушение	Q	5,00E-08			

Top event probability Q = 5,000E-08							
No.	Prob.	%	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	
1	1,000E-08	20,00	1	5			
2	1,000E-08	20,00	1	4			
3	1,000E-08	20,00	2	5			
4	1,000E-08	20,00	2	4			
5	9,999E-09	20,00	1	3	6		

Рис. 2.7.20. Результаты решения обратной задачи при оценке безопасности ж.д.

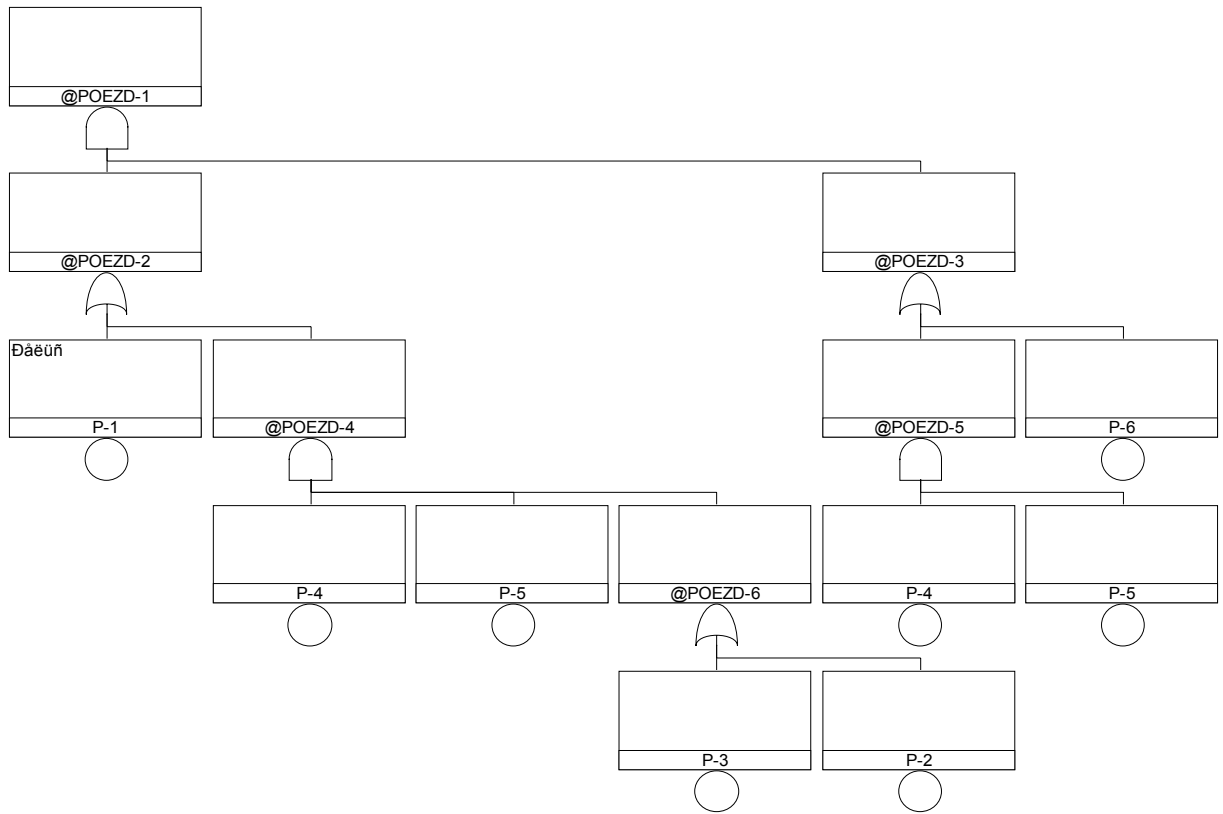


Рис. 2.7.21. Дерево «успеха» для прямой задачи по оценке безопасности ж.д.

Сводная таблица результатов раздела 2.7. " Расчет безопасности участка железной дороги "				
Параметры элементов	Характеристики задачи	Результаты моделирования и расчетов		
		Relex Fault Tree	ПК АСМ	Risk Spectrum
1	2	3	4	5
P1=0.9; P2= 0.9; P4= 0.999; P5= 0.999; P3= 0.9.	Моделирование и расчет вероятности отсутствия аварии	0.990638	0.99063818	0.9906
	Моделирование и расчет вероятности возникновения аварии	0.009362	0.00936182	
Моделирование и расчет вероятности возникновения аварии при p1 =0.0001 p2 =0.0001 p3 =0.9999 p4 =0.9999 p5 =0.9999		5.0e-8	5 E-08	5 E-08

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.7

Выводы специалистов ИПУ РАН

Пример данного раздела проверяет возможности разнообразного моделирования одной немонотонной задачи. Все программные комплексы успешно справились с данной задачей. Правда, на ПК Risk Spectrum решение получено некоторым «ручным» приемом. А на ПК Relex пока такая возможность имеется только в деревьях отказов, успехов (см. выводы ИПУ РАН по разделу 2.1).

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Решения данной задачи, приведенные специалистами ИПУ РАН, убедительно подтверждает, что модуль Relex Fault Tree позволяет корректно решать немонотонные задачи логико-вероятностного моделирования, представляемые соответствующими деревьями отказов (см. рис.2.7.2 и рис.2.7.3). Это первое известное нам решение немонотонной задачи, полученное вне технологии и ПК АСМ. Результаты расчетов вероятностей отсутствия и возникновения аварии, полученные с помощью ПК АСМ и с помощью модуля Relex Fault Tree полностью совпали. Хотелось бы сравнить и оценки значимостей и вкладов элементов, но эти данные в результатах расчетов модулем Relex Fault Tree пока отсутствуют. Поскольку решения этой задачи с помощью модуля блок-схем Relex RBD не приведено, неясно, реализована ли возможность немонотонного моделирования блок-схем в этом программном модуле.
2. Мы повторили на ПК АСМ все способы моделирования и расчета данной задачи, которые были использованы специалистами СПБАЭП. Основные результаты совпали. Вместе с тем, мы не можем согласиться с заключением СПБАЭП о возможности решения немонотонных задач с помощью ПК Risk Spectrum. Приведенное ими решение, по нашему мнению, является не машинным, а изящным ручным приведением данной частной немонотонной задачи к монотонной структурной схеме (дереву отказов на рис.2.7.19 и дереву "успеха" на рис.2.7.21). Полагаем, что для более сложных задач такая методика малопригодна. В качестве иллюстрации мож-

но предложить специалистам СПБАЭП попытаться повторить с помощью их методики решение немонотонной задачи, приведенной в Примере 8 раздела 2.1.

3. В ходе исследования нам удалось представить с помощью СФЦ и решить методами и средствами технологии и ПК АСМ все приведенные в данном разделе варианты постановки рассматриваемой задачи. Это еще раз подтвердило высокую логическую универсальность аппарата СФЦ, ОЛВМ, технологии и ПК АСМ, разрабатываемых специалистами ОАО "СПИК СЗМА".

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Все три программных комплекса могут решать задачи рассматриваемого класса.
2. ПК АСМ обеспечивает расчет, как вероятности успеха, так и вероятности аварии по одной и той же модели (СФЦ). При использовании других ПК (Relex и Risk Spectrum) для решения прямой и обратной задачи требуется разработка специальных деревьев отказов.
3. Использование прямой логики рассуждений в отдельных случаях позволяет как бы «автоматически» учесть особенности проявления и развития аварийных ситуаций, что обеспечивает получение более адекватных результатов, чем с помощью других методов и кодов.
4. В отличие от кодов АСМ и Relex, код Risk Spectrum не обеспечивает реализацию булевой операции отрицания (в этом коде использование соответствующего оператора равносильно заданию логического нуля (**0** - **Ложь**) для соответствующей ветви дерева или базисного события), что затрудняет моделирование сложных условий подключения резерва, ветвление процессов и т.п.

2.8. Расчет надежности системы с защитой

2.8.1. Описание задачи

Имеется система, состоящая из технического объекта и системы защиты объекта от последствий отказов его элементов. В качестве примера такого объекта может служить ядерная реакторная установка, реактор которой подлежит останову после прекращения циркуляции теплоносителя по 1 контуру, см. рис. 2.8.1.

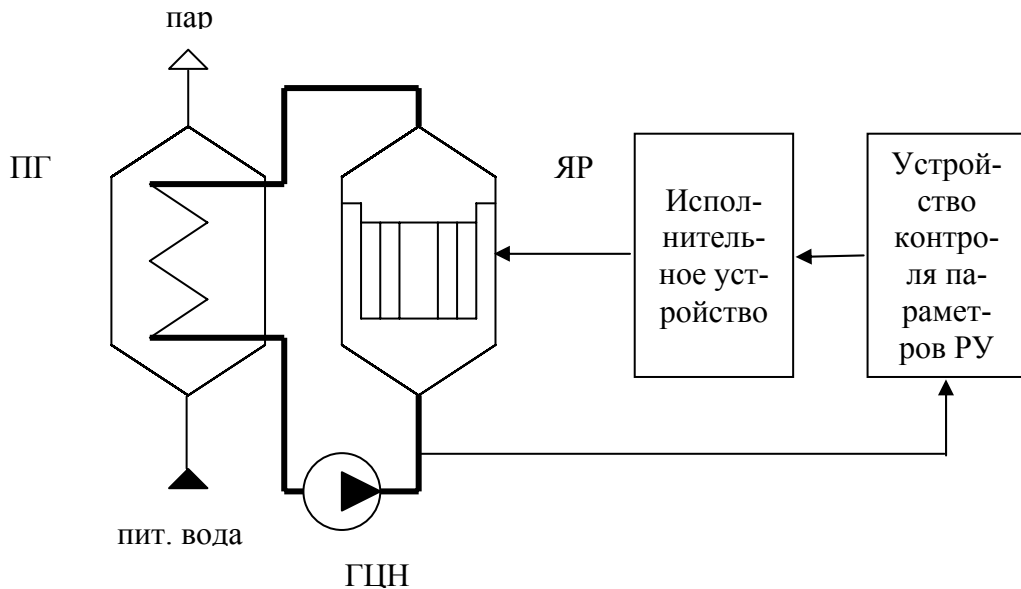


Рис. 2.8.1. Схема технического объекта с системой защиты

Степень последствий отказа такой системы зависит от того, в какой последовательности (во времени) происходят отказы ее элементов.

Так, если в момент прекращения циркуляции по 1 контуру система защиты будет работоспособна, то произойдет штатный останов ЯР и последствия отказа будут минимальны. После устранения причины прекращения циркуляции по 1 контуру ЯР может быть снова введен в действие.

В другом варианте развития аварии может сложиться такая ситуация, когда после штатного останова ЯР происходит отказ самой системы защиты. В данном случае состояние объекта защиты не ухудшится, но для ввода его в действие потребуется вначале отремонтировать систему защиты.

В третьем варианте, отказ защиты происходит до момента прекращения циркуляции по первому контуру, что приводит к невозможности заглушения реактора и, как следствие, к тяжелой аварии.

Необходимо рассчитать, с учетом последовательностей отказов элементов:

- вероятность возникновения аварии на интервале $(0 \div 10000\text{ч})$;
- вероятность штатного останова на интервале $(0 \div 10000\text{ч})$.

Расчет должен быть проведен при следующих исходных данных:

- интенсивность отказов устройства контроля системы защиты = $3e-6$;
- интенсивность отказов исполнительного устройства системы защиты = $5e-6$;
- интенсивность отказов Объекта = $2e-5$;
- система защиты срабатывает мгновенно.

2.8.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Дерево отказов для системы «Объект-Аварийная Защита», набранное в редакторе модуля Relex Fault Tree, приведено на рис. 2.8.2.

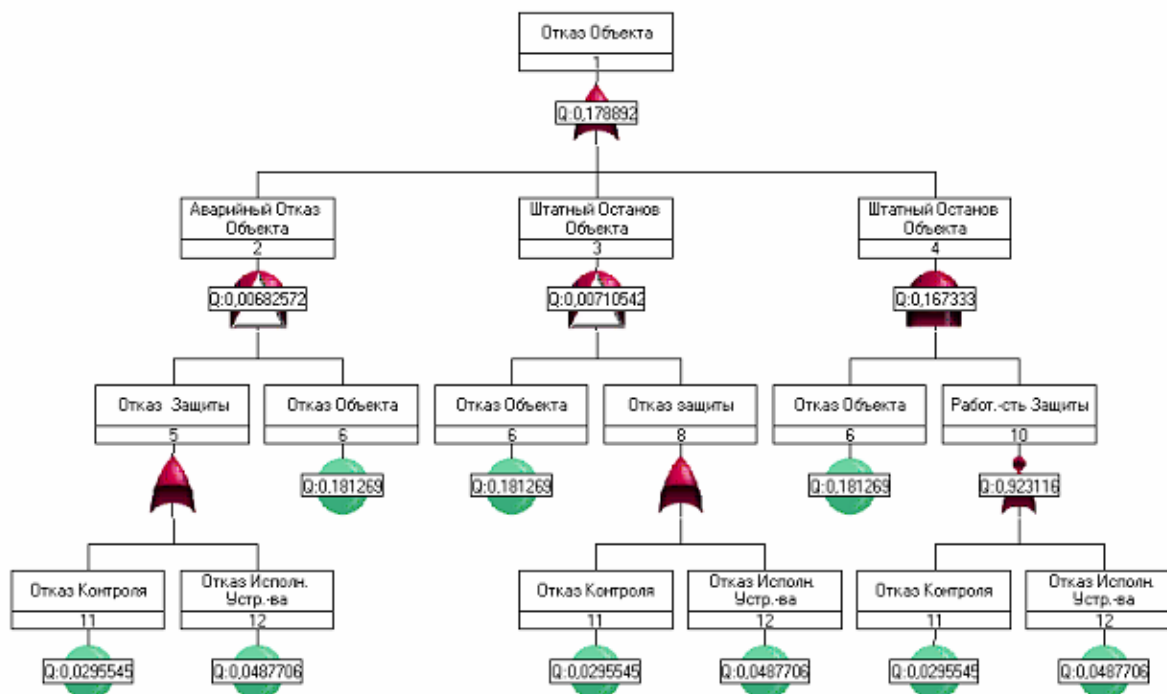


Рис. 2.8.2. Дерево отказа системы Объект+Аварийная Защита в Relex Fault Tree

В результате расчета получено:

- вероятность возникновения аварии на интервале $(0 \div 10000\text{ч}) = 0.006826$;
- вероятность штатного останова на интервале $(0 \div 10000\text{ч}) = 0.174438$.

При построении модели была учтена очередность возникновения отказов устройств системы защиты и Объекта. Для этого использовались динамические операторы дерева “приоритетное И” (см. рис.1.20), которые “срабатывают” при очередности слева - направо. Авария может возникнуть лишь при отказе объекта после отказа системы защиты. При другой последовательности (т.е. когда сначала отказывает объект), работоспособная система защиты срабатывает и осуществляет штатный безаварийный останов. В дальнейшем отказ системы защиты (если он возможен) не приведет к аварии. В данном примере предполагается, что система защиты срабатывает мгновенно. Если же требуется некоторое время для работы системы защиты и осуществления перевода всей системы (после аварийного отказа объекта) в безопасный штатный останов, то и такую модель можно построить на динамических деревьях Relex.

2.8.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

На рис. 2.8.3 изображена СФЦ, являющаяся точным аналогом дерева отказов, приведенного на рис. 2.8.2. На этой СФЦ представлены всего три элемента исследуемой системы:

- x_6 - безотказность объекта ($\lambda_6 = 2e - 5$) 1/час.;
- x_{11} - безотказность устройства контроля системы защиты ($\lambda_{11} = 3e - 6$) 1/час.;
- x_{12} - безотказность исполнительного устройства системы защиты ($\lambda_{12} = 5e - 5$) 1/час.

Для представления в ДО на рис. 2.8.3 (как и на рис. 2.8.2) трех вариантов отказов данной системы, выполнено размножение обозначений указанных элементов:

1. Функциональные вершины 6, 62 и 63 представляют одно событие безотказной работы объекта;
2. Функциональные вершины 11, 112 и 113 представляют одно событие безотказной работы сигнализирующего устройства контроля системы защиты;
3. Функциональные вершины 12, 122 и 123 представляют одно событие безотказной работы исполнительного устройства системы защиты

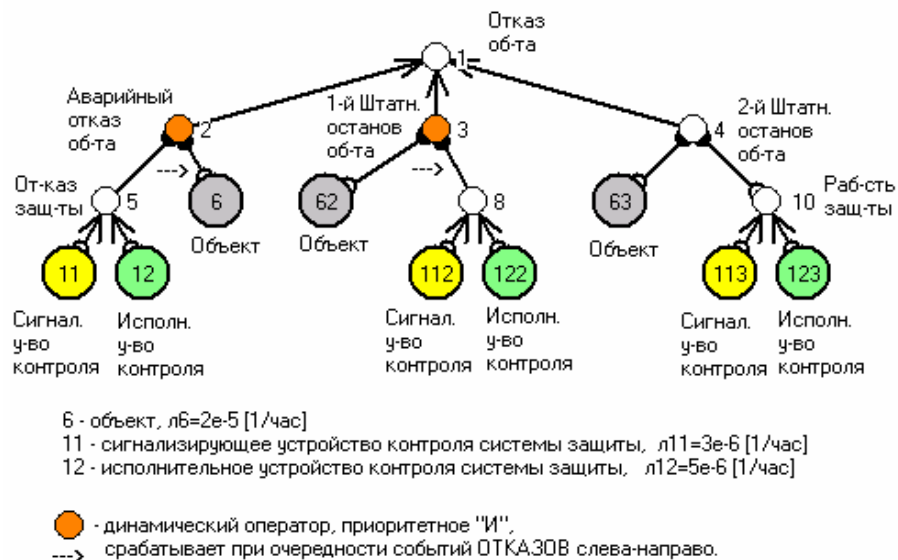


Рис. 2.8.3. СФЦ дерева отказов системы «Объект - Аварийная Защита»

Все необходимые элементарные события отказа элементов представлены в СФЦ на рис. 2.8.3 с помощью инверсных выходов связей функционального подчинения.

Как и в ДО на рис. 2.8.2, в данной СФЦ на рис.2.8.3 выделены два логических элемента (фиктивные вершины 2 и 3), с помощью которых обозначены динамические операторы "приоритетное И". Особенность этих операторов заключается в том, что при расчете вероятности $P(\tilde{y}_2)$ и $P(\tilde{y}_3)$ их выходных функциональных событий \tilde{y}_2 и \tilde{y}_3 необходимо учесть все возможные последовательности отказов обеспечивающих элементов в направлении указанном на схеме стрелкой "слева-направо". Для расчета вероятностей любых видов последовательностей отказов а технологии и ПК АСМ разработана специальная утилита, в основе которой лежит аналитический метод построения и анализа комбинаторно-последовательных логических моделей исследуемых систем.

Выполненные с использованием указанной утилиты аналитическое моделирование и расчет вероятностей заданных трех видов отказов рассматриваемой системы с защитой, на интервале 0-100000 час наработки, дал следующие результаты.

1. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИЙНОГО ОТКАЗА ОБЪЕКТА

Событие аварийного отказа объекта определяется критерием y_2 . Раскрывая этот критерий на основе СФЦ, изображенной на рис. 2.8.3, определяем все составляющие его последовательности отказов sj и вычисляем их вероятности $p_{AO}(sj)$, $j = 1, 2, \dots, 6$:

Таблица 2.8.1.

Вероятности последовательностей аварийного отказа объекта		
j	sj	$p_{AO}(sj)$
1	$(\bar{x}_{11} \rightarrow \bar{x}_{12} \rightarrow \bar{x}_6)$	4.17094744319719E-5
2	$(\bar{x}_{12} \rightarrow \bar{x}_{11} \rightarrow \bar{x}_6)$	4.19159733955125E-5
3	$(\bar{x}_{12} \rightarrow \bar{x}_6 \rightarrow \bar{x}_{11})$	4.37505603666938E-5
4	$(\bar{x}_{11} \rightarrow \bar{x}_6 \rightarrow \bar{x}_{12})$	4.33153042926E-5
5	$(\bar{x}_{12} \rightarrow \bar{x}_6 \rightarrow x_{11})$	0.00418249737094801
6	$(\bar{x}_{11} \rightarrow \bar{x}_6 \rightarrow x_{12})$	0.00247587356410176

Сумма вероятностей $P_{AO}(sj)$ составляет искомую вероятность аварийного отказа объекта (вероятность возникновения аварии объекта):

$$P_C(y_2) = P_{AO}(10000) = \sum_{j=1}^6 p_{AO}(sj) = 0.00682906224753655 \quad (2.8.1)$$

Вычисленная средствами технологии АСМ вероятность (2.8.1) этого события несколько отличается от результата ее расчета, полученного с помощью модуля Relex Fault Tree, который составляет **0.0682572** (см. рис.2.8.2, "Аварийный Отказ Объекта 2").

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ ПЕРВОГО ШТАТНОГО ОСТАНОВА ОБЪЕКТА

Событие первого штатного останова объекта определяется критерием y_3 . Раскрывая этот критерий на основе СФЦ, изображенной на рис. 2.8.3, определяем все составляющие его последовательности отказов sj и вычисляем их вероятности $p_{1шo}(sj)$, $j = 1, 2, \dots, 4$:

Таблица 2.8.2.

Вероятности последовательностей первого штатного останова		
j	sj	$p_{1шo}(sj)$
1	$(\bar{x}_6 \rightarrow \bar{x}_{11} \rightarrow \bar{x}_{12})$	4.51794695420625E-5
2	$(\bar{x}_6 \rightarrow \bar{x}_{12} \rightarrow \bar{x}_{11})$	4.54085964162797E-5
3	$(\bar{x}_6 \rightarrow \bar{x}_{11}) \cdot x_{12}$	0.00262016293429706
4	$(\bar{x}_6 \rightarrow \bar{x}_{12}) \cdot x_{11}$	0.00439682874331591

Сумма вероятностей $p_{1шo}(sj)$ составляет искомую вероятность первого варианта штатного останова объекта:

$$P_C(y_3) = P_{1шo}(10000) = \sum_{j=1}^4 p_{1шo}(sj) = 0.00710757974357131 \quad (2.8.2)$$

Этот результат также несколько отличается от результата, полученного в Relex Fault Tree, который составляет **0.00710542** (см. рис. 2.8.2, "Штатный Останов Объекта 3).

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ ВТОРОГО ШТАТНОГО ОСТАНОВА ОБЪЕКТА

Событие второго штатного останова объекта определяется критерием y_4 . Это событие определяется отказом объекта (6) и безотказной работой (в течение всех 10000 час.) устройства контроля системы защиты (11) и исполнительного устройства системы защиты (12). Раскрывая этот критерий на основе СФЦ, изображенной на рис.2.8.3, определяем единственную последовательность (комбинацию) элементарных событий sj и вычисляем ее вероятность $p_{2oi}(sj)$:

Таблица 2.8.3.а.

Вероятности последовательностей второго штатного останова		
j	sj	$p_{2oi}(sj)$
1	$\bar{x}_6 \cdot x_{11} \cdot x_{12}$	0.16733260493091

Вероятность $p_{2oi}(sj)$ составляет искомую вероятность второго варианта штатного останова:

$$P_c(y_4) = P_{2oi}(10000) = p_{2oi}(sj) = 0.16733260493091 \quad (2.8.3)$$

Этот результат совпал с точностью до округления с результатом, полученным в Relex Fault Tree, который составляет **0.167333** (см. рис. 2.8.2, "Штатный Останов Объекта 4).

РАСЧЕТ ОБЩЕЙ ВЕРОЯТНОСТИ ШТАТНОГО ОСТАНОВА ОБЪЕКТА

Общая вероятность штатного останова объекта равна сумме вероятностей (2.8.2) и (2.8.3) и составляет

$$\begin{aligned} P_{oi}(10000) &= P_{1oi}(10000) + P_{2oi}(10000) = \\ &= 0.00710757974357131 + 0.16733260493091 = 0.17444018467448131 \end{aligned} \quad (2.8.4)$$

Вероятность этого события, вычисленная Relex Fault Tree, по данным, приведенным на рис.2.8.2, "Штатный останов объекта 3" + "Штатный останов объекта 4", составляет **0.17443842**, что несколько отличается от результата (2.8.4) полученного методами и средствами технологии АСМ.

РАСЧЕТ ОБЩЕЙ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА ОБЪЕКТА

Общая вероятность отказа объекта, вычисленная средствами АСМ, равна сумме вероятностей (2.8.1) и (2.8.4)

$$\begin{aligned} Q_c(10000) &= P_{Ai}(10000) + P_{oi}(10000) = \\ &= 0.00682906224753655 + 0.17444018467448131 = 0.18126924692201786 \end{aligned} \quad (2.8.5)$$

Этот результат также несколько отличается от результата Relex Fault Tree, приведенного на рис. 2.8.2 "Отказ объекта 1" и равного **0.178892**. Следует отметить, что контрольный расчет суммы вероятностей аварийного отказа и штатных остановов, выполненный по данным, указанным на рис. 2.8.2 (Relex Fault Tree) дал третий результат

$$\begin{aligned} Q_c(10000) &= 0.00682572 + 0.00710542 + 0.167333 = \\ &= 0.00682572 + 0.17443842 = 0.18126414 \end{aligned} \quad (2.8.6)$$

Однако он значительно ближе к (2.8.5).

Выяснение причин отмеченных расхождений результатов моделирования и расчетов показателей надежности систем с учетом последовательностей отказов элементов нуждается в дополнительных исследованиях.

2.8.4. Результаты решения на «RISK SPECTRUM»

Окно ПК «Risk Spectrum» с результатами моделирования и расчетов представлено на рисунках 2.8.4 -

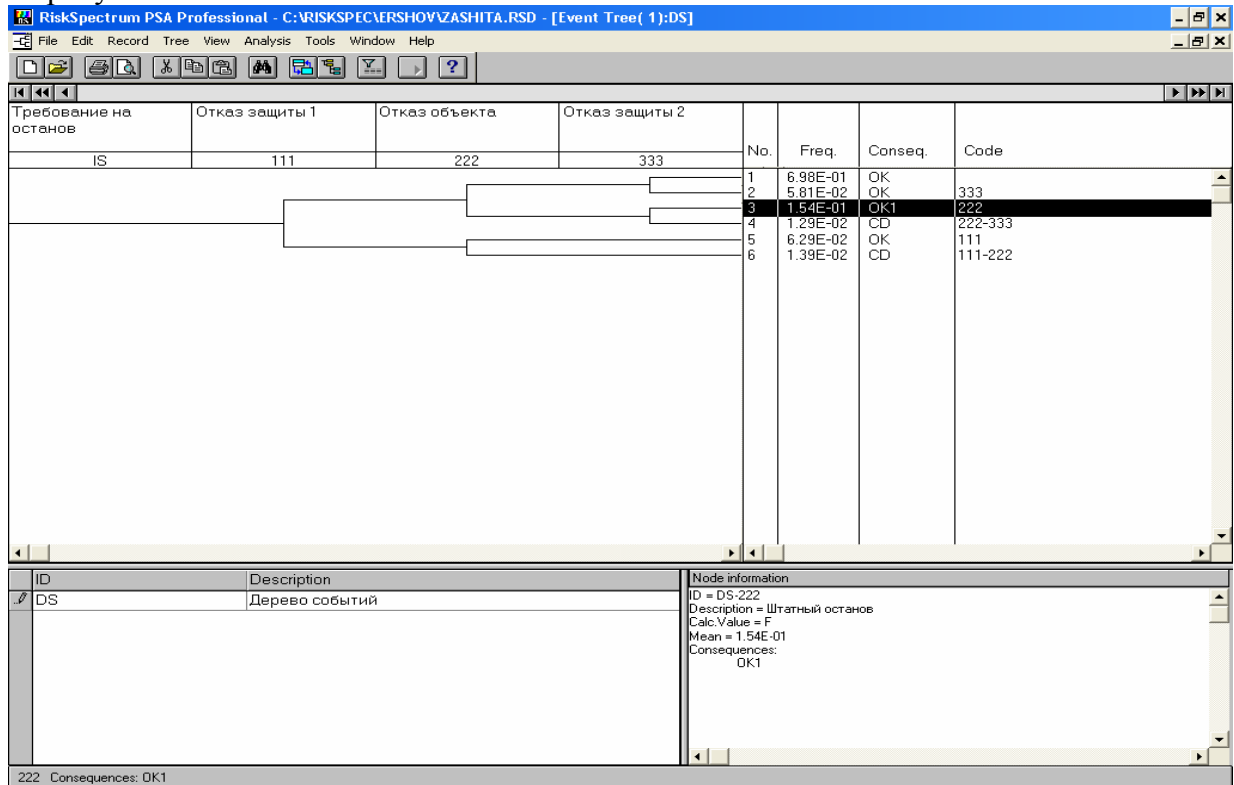


Рис. 2.8.4. Дерево событий для системы с защитой и результаты расчетов с учетом вероятности успешного срабатывания систем

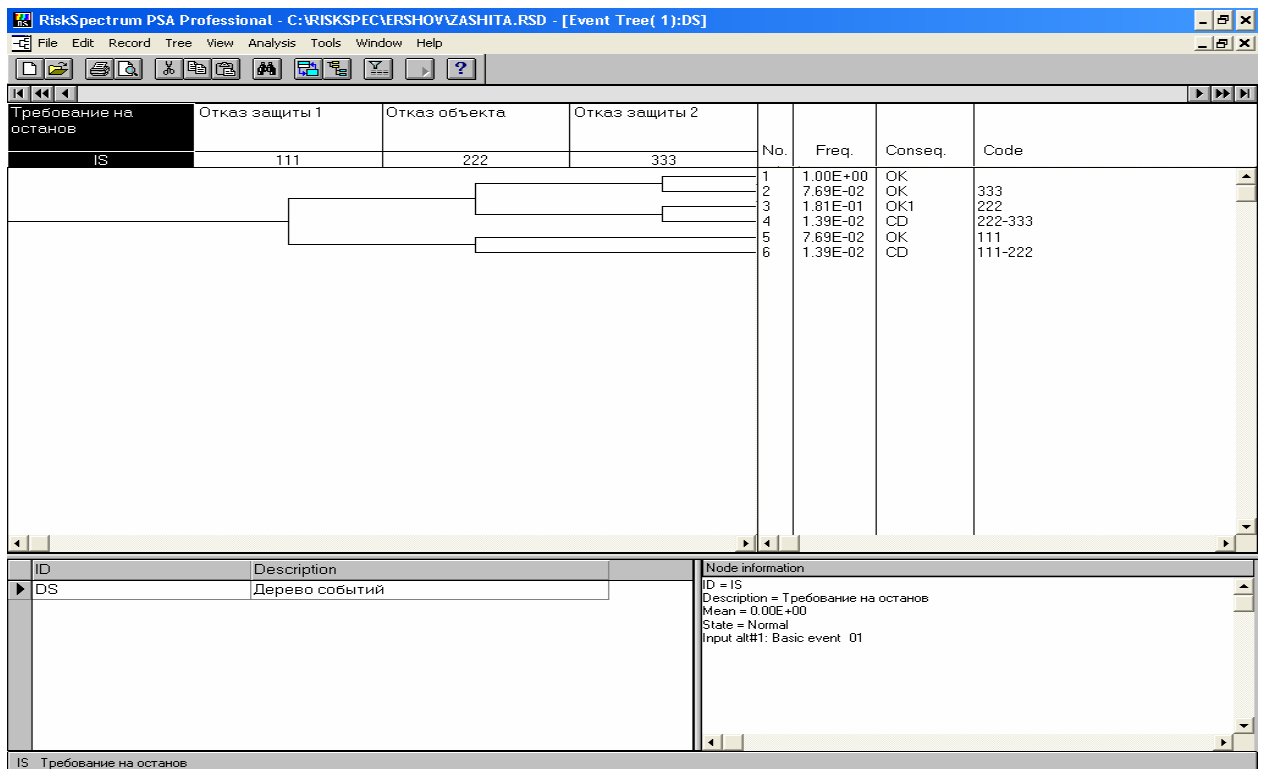


Рис. 2.8.5. Дерево событий для системы с защитой и результаты расчетов без учета вероятности успешного срабатывания систем

RiskSpectrum PSA Professional - C:\RISKSPEC\ERSHOV\ZASHITA.RSD - [Sequence Analysis Case(1):6]

File Edit Record View Analysis Tools Window Help

ID - Char. # 1	Description	Calc.type	Mean	5th perc.	Median	95th perc.	Text Result	Gate Out	BE Out	Exch
1		F	1.26E-01	1.26E-01	1.26E-01	1.26E-01	No	No	No	N
2		F	1.05E-02	1.05E-02	1.05E-02	1.05E-02	No	No	No	N
3		F	2.80E-02	2.80E-02	2.80E-02	2.80E-02	No	No	No	N
4		F	2.33E-03	2.33E-03	2.33E-03	2.33E-03	No	No	No	N
5		F	1.14E-02	1.14E-02	1.14E-02	1.14E-02	No	No	No	N
6		F	2.53E-03	2.53E-03	2.53E-03	2.53E-03	No	No	No	N

Setup Type	Setup ID	Run	Result
MCS Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Uncertainty Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Importance Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Time-dep. Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes

Analysis Sequence BC Set Memos

IS Требование на останов

Рис. 2.8.6. Результаты расчета вероятности реализации аварийных последовательностей с учетом вероятности поступления требования на останов объекта

RiskSpectrum PSA Professional - C:\RISKSPEC\ERSHOV\ZASHITA.RSD - [Consequence Analysis Case(1):OK]

File Edit Record View Analysis Tools Window Help

ID - Char. # 1	Description	Calc.type	Mean	5th perc.	Median	95th perc.	Text Result	Gate Out	BE Out	Exch
CD		F	4.86E-03	5.05E-03	5.05E-03	5.05E-03	No	No	No	N
OK		F	1.81E-01	1.81E-01	1.81E-01	1.81E-01	No	No	No	N
OK1		F	3.29E-02	3.29E-02	3.29E-02	3.29E-02	No	No	No	N

Setup Type	Setup ID	Run	Result
MCS Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Uncertainty Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Importance Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Time-dep. Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes

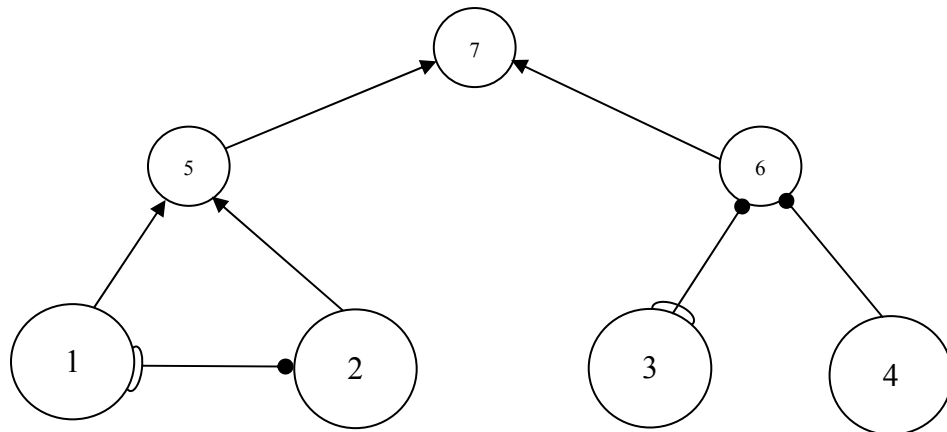
Analysis Consequence Event Tree BC Set Memos

Рис.2.8.7. Результаты расчета вероятностей реализации отдельных конечных состояний системы с защитой при аварии

Как следует из результатов расчета, в ряде случаев получено довольно хорошее схождение с результатами расчетов с помощью ПК Relex. Однако в большинстве случаев результаты расчета вероятности аварии не совпадают с результатами расчетов по ПК Relex. Как отмечалось в п. 2.8.3, не совпали результаты расчетов по ПК Relex и с результатами, полученными с помощью ПК АСМ СЗМА.

Для выяснения причин данного расхождения задача была решена с помощью ПК NEWACM. СФЦ, отображающая моделируемую ситуацию, представлена на рис. 2.8.5. Здесь вершина №1 отображает случайное событие работоспособности системы защиты на момент поступления требования на остановку объекта. Вероятность этого события в соответствии с принятыми исходными данными, составляет 0.923116347. Вершина №4 отображает случайное событие работоспособности системы защиты в момент выполнения требования на остановку объекта. Вероятность данного события принята равной вероятности события №1. События №2 и №3 представляют собой случайные события работоспособности объекта.

Все события в СФЦ – **неразмноженные**. Такое решение принято в результате детального анализа данных, представленных на рис.2.8.2. Ручные расчеты вероятности реализации отдельных ветвей дерева показывают, что, например, работоспособность системы защиты представлена на нем тремя случайными событиями, имеющими вероятность отказа (слева направо) – 0.0376552, 0.039198 и 0.076884.



В таблице 2.8.3.б представлены сводные результаты расчетов вероятности реализации отдельных аварийных ситуаций с помощью всех четырех кодов.

Таблица 2.8.3.б.

№№ п/п	Описание логического критерия	Результаты расчетов			
		Relex	NEWACM	Risk Spectrum	Технология АСМ
1	Авария	0.00682572	0.0048396	0.004858	0.006829062
2	«Первый» штатный останов	0.00710542	-		0.00710758
3	«Второй» штатный останов	0.167333	0.167332553	0.1545	0.167332605
4	Авария + первый штатный останов	0.013882605	0.013936647		
5	Вершинное событие	0.178892	0.17893714531	0.18131	0.181269247

Как следует из представленных данных, расчеты по различным кодам практически нигде не совпадают. Причина расхождения для кодов NEWACM и АСМ СЗМА – использование размноженных вершин во втором случае. При использовании размноженных вершин в СФЦ рис.2.8.3 имеем практически полное совпадение результатов расчета.

Причины расхождения с результатами кода Relex требуют изучения.

Сводная таблица результатов раздела 2.8. " Расчет надежности системы с защитой "				
Параметры элементов	Характеристики задачи	Результаты моделирования и расчетов		
		Relex Fault Tree	ПК АСМ	Risk Spectrum
1	2	3	4	5
интенсивность отказов устройства контроля = $3e-6$;	Аварийный отказ объекта	0.00682572	0.0068290623	0.004858
	Первый штатный останов	0.00710542	0.0071075797	не вычислена
интенсивность отказов исполнительного устройства = $5e-6$;	Второй штатный останов	0.167333	0.1673326049	0.1545
	Общая вероятность двух штатных остановов		0.1744401847	
интенсивность отказов Объекта = $2e-5$;	Отказ объекта	0.178892	0.181269	0.18131

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.8

Выводы специалистов ИПУ РАН

В разделе рассматривается простейшая задача, для моделирования которой требуется учесть последовательность возникновения отказов. Подобные задачи встречаются практически всегда, когда рассматривается контроль и реакция на него. Задача правильно решена на ПК Relex и ПК АСМ. Предложенные решения на ПК Risk Spectrum неверны. Используемая в ПК Risk Spectrum логико-вероятностная технология принципиально не позволяет решать задачи данного класса (т.е. учитывать последовательность возникновения отказов). Незначительные расхождения решений на ПК Relex и ПК АСМ объясняются тем, что мы решали задачу «по умолчанию», когда устанавливается точность 10^{-3} . При установке нами точности 10^{-6} (а максимально возможная – 10^{-8}) шесть цифр решений на ПК Relex и ПК АСМ совпали.

Отметим, что учет возможности несовместных видов отказов и последовательности их возникновения является специфической особенностью систем с защитой и, в общем случае, – анализа опасностей, безопасности.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Непосредственно в программных комплексах АСМ средства решения задач данного класса еще не внедрены. Теоретическая и программная разработка метода учета последовательностей отказов в технологии АСМ завершена. Получено общее аналитическое решение задачи расчета вероятности любой последовательности отказов элементов системы отдельно и в совокупности с группой элементов, проработавших безотказно (для случая экспоненциального закона распределения времени их безотказной работы). Для проведения НИР использовалась программная утилита АСМ-последовательности, в которой реализован разработанный метод вычислений вероятностей заданных последовательностей отказов элементов, которая в настоящее время внедряется в ПК АСМ СЗМА.
2. Все расчеты вероятностей промежуточных событий данного примера (аварийный отказ, первый штатный и второй штатный отказы), полученные с помощью утилиты АСМ, практически совпали с результатами соответствующих расчетов, полученных с помощью модуля Relex Fault Tree (см. первые три строки сводной таблицы раздела 2.8). Отличия начинаются только в пятом-шестом разряде. По нашему опыту даже такие, незначительные, на первый взгляд, отклонения необходимо

анализировать, поскольку в равноценных аналитических методах их не должно быть. Нам неизвестны методы решения, реализованные в модуле Relex Fault Tree, поэтому ответ на данный вопрос могут дать только дальнейшие совместные исследования.

3. Различия в расчете вероятности конечного результата более существенные. Расчеты утилитой АСМ-последовательности дают общую вероятность отказа объекта **0.181269**, а результат модуля Relex Fault Tree составляет **0.178892**. Следует отметить, что простая сумма первых трех вероятностей, полученных Relex Fault Tree (см. сводную таблицу) дает результат **0.18126414**, который существенно ближе к результату, полученному с помощью утилиты АСМ. Уяснение причин такого расхождения нуждается в дополнительных исследованиях совместно со специалистами ИПУ РАН.

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Задача решена всеми тремя программными комплексами, однако, результаты решения по различным критериям в большинстве случаев не совпадают. Не удалось установить и степень близости решений между отдельными кодами. В ряде случаев имеем большую близость решений между АСМ и Relex, в других – между АСМ и Risk Spectrum, в третьих – между Relex и Risk Spectrum.

2. Анализ научно-технической литературы по данному вопросу (Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. Надежность технических систем и оценка риска, М.: Машиностроение, 1984. стр. 58-60) показывает, что логический оператор «приоритетно И» может быть заменен комбинацию логических операторов «И». Следовательно, и код АСМ и код Risk Spectrum теоретически должны решать задачи указанного класса.

3. Необходимо продолжить исследования задач данного класса.

2.9. Расчет надежности и эффективности системы с защитой

2.9.1. Описание задачи

Рассматривается конфигурация Объект (О) + Система Защиты (СЗ) (рис. 2.9.1.). Система защиты состоит в свою очередь из устройства контроля и исполнительного механизма.

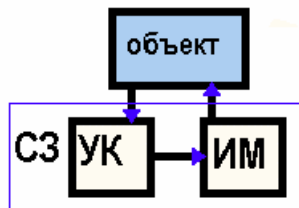


Рис. 2.9.1. Конфигурация Объект + Система Защиты

Рассмотрим более подробно работу и отказы в системе.

Подсистемы защиты предназначены для выработки управляющих воздействий на защищаемый объект (технологическое оборудование) с целью предотвращения развития нештатных отклонений в работе объекта и, в частности, перерастания отказов в аварию (здесь будем рассматривать только отклонения в работе объекта, связанные с отказами).

Управляющие воздействия могут быть различными (напр., изменение режима работы, снижение производительности). В некоторых случаях они реализуют отключение аварийно отказавших элементов и других элементов, связанных с первыми по технологической цепи. Тем самым предотвращается развитие событий, приводящих к аварии. Как правило, это бывает эквивалентно останову объекта, технологического процесса. Здесь будем рассматривать именно такой случай, но предлагаемый подход годится и для управляющих воздействий, приводящих к снижению производительности, изменению режима.

Функция противоаварийной защиты выполняется эпизодически, в момент возникновения аварийной ситуации, поэтому подсистема защиты (СЗ) работает в ждущем временном режиме. Характер доходов в работоспособных состояниях и потерь в неработоспособных состояниях объекта (О) предполагается следующим. Во-первых, в системе (в данном примере это О + СЗ) возможны четыре группы технических состояний (техническое состояние характеризуется наборами отказавших и работоспособных элементов модели (СЗ, О), видами и последовательностью возникновения отказов). Первая группа содержит такие технические состояния, в которых объект нормально функционирует и приносит удельный доход в единицу времени пребывания в этих состояниях (напр., этим состояниям соответствует номинальная производительность О). Отметим, что в эту группу входят состояния со скрытым отказом (типа несрабатывания на требование) подсистемы защиты. Вторая группа состояний характеризуется безаварийным остановом объекта. Потери здесь связаны только с простоем объекта; доход в этих состояниях либо равен нулю, либо отрицательный, если простой приводит к дополнительным потерям в единицу времени. Третья и четвертая группы состояний – аварийные отказы объекта двух видов. Переход в эту группу состояний из состояний первой группы приносит единовременный ущерб (отрицательный доход) связанный с возникновением аварии (гибель людей, поломки оборудования, выбросы в атмосферу и т.п.). Таким образом, нормальное функционирование объекта сопровождается линейным ростом интегрального дохода пропорционально времени пребывания в первой группе состояний. Простои объекта в состояниях второй, третьей и четвертой групп ведут к сохранению достигнутого уровня интегрального дохода

(при нулевых значениях удельных доходов в каждом из состояний этих групп) либо к его убыванию (при отрицательных значениях соответствующих удельных доходов) пропорционально времени пребывания в этих состояниях. При переходах между состояниями имеет место скачкообразное изменение (чаще уменьшение) интегрального дохода в тех случаях, когда с соответствующими переходами связаны единовременные доходы за каждый переход. Обычно эти доходы отрицательны, обусловлены затратами на восстановление последствий отказов, аварий, приобретение оборудования, ЗИП'а, штрафы, страховку и т.п.

Предположим, что все аварийные ситуации (АС) возникают только при отказах технологического оборудования. Пусть СЗ при возникновении распознаваемой ей АС мгновенно останавливает технологический процесс, производя необходимое управление оборудованием (например, отключение). Причем работоспособная СЗ с "покрытием" β ($0 \leq \beta \leq 1$) распознает аварийные ситуации. Отказы в СЗ, которые возникают на интервале нормального функционирования О, могут приводить к различным последствиям. Выделим отказы двух видов: скрытые отказы и ложные срабатывания. Скрытые отказы не приводят к срабатыванию защиты и не изменяют режим работы объекта. Они проявляются в виде несрабатывания защиты при возникновении АС, что влечет за собой аварию.

Параметры модели:

W_{ij} – потери от переходов в состояния аварии;

β - "покрытие"- доля распознаваемых аварийных ситуаций работоспособной СЗ;

α - доля скрытых отказов устройств СЗ типа «несрабатывание»;

$1-\alpha$ - доля явных отказов устройств СЗ типа «ложное срабатывание»;

η_1, η_2 – доля аварийных отказов I и II рода О;

λ, μ - интенсивности отказов и восстановления СЗ, О.

Рассматриваемая система (О + СЗ) имеет 4 подмножества состояний:

- нормальное функционирование;
- останов (безаварийный);
- авария I;
- авария II.

Необходимо сделать расчет средних рисков на интервале ($t=0 \div 1000$ ч) для трех значений параметра β . Рассматриваются случаи наличия и отсутствия восстановления из состояний аварий. Среднее время восстановления из аварии I - 5суток. Среднее время восстановления из аварии II - 10суток. Ущерб от перехода в состояние аварии II равен 8 баллов, в состояние аварии I - 4 балла.

2.9.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Граф переходов марковской модели представлен на рис. 2.9.2.

Интенсивности переходов:

$$\lambda_{12} = [1 - (1 - \beta) \cdot (\eta_1 + \eta_2)] \cdot \lambda_o + (1 - \alpha_k) \cdot \lambda_k + (1 - \alpha_{им}) \cdot \lambda_{им};$$

$$\lambda_{13} = \alpha_k \cdot \lambda_k;$$

$$\lambda_{14} = \alpha_{им} \cdot \lambda_{им};$$

$$\lambda_{15} = (1 - \beta) \cdot \eta_1 \cdot \lambda_o;$$

$$\lambda_{17} = (1 - \beta) \cdot \eta_2 \cdot \lambda_o;$$

$$\lambda_{21} = \lambda_{61} = \mu;$$

$$\lambda_{32} = (1 - \eta_1 - \eta_2) \cdot \lambda_o + (1 - \alpha_{им}) \cdot \lambda_{им};$$

$$\lambda_{37} = \lambda_{47} = \eta_2 \cdot \lambda_o;$$

$$\lambda_{35} = \lambda_{45} = \eta_1 \cdot \lambda_o;$$

$$\lambda_{46} = (1 - \eta_1 - \eta_2) \cdot \lambda_o.$$

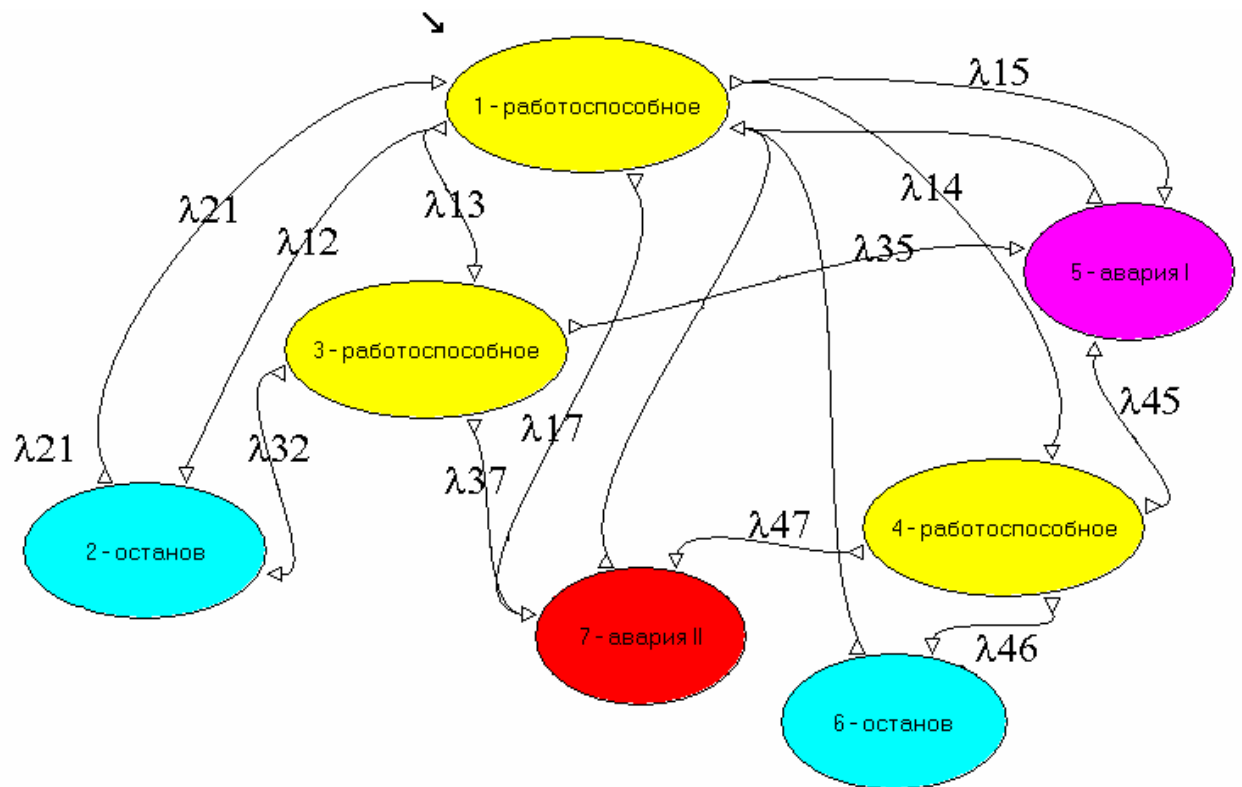


Рис. 2.9.2. Граф переходов состояний Марковской модели в Relex Markov

Значение параметров модели:

$$\lambda_o = 0.005; \lambda_k = 0.001; \lambda_{им} = 0.002; \alpha_k = 0.3; \alpha_{им} = 0.5; \eta_1 = 0.4; \eta_2 = 0.3; \mu = 0.05.$$

Балльная оценка ущербов произведена по результатам проведения экспертами качественного анализа видов и последствий отказов (модуль Relex FMEA/FMECA) (см. таблицу 2.9.1).

Таблица 2.9.1.

Характеристика последствий отказа	ВЗ, баллы
Отказ вызывает разгерметизацию аппарата, выброс опасной среды из аппаратуры, пожар, взрыв, образование токсического облака, цепное развитие аварии на промплощадке предприятия и за его пределами. Среди персонала и населения могут быть жертвы; есть необходимость эвакуации населения; окружающая среда получит значительный ущерб; объект – полное разрушение; остановка производства может быть 1 месяц и более.	9 - 10
Отказ вызывает разгерметизацию аппарата, выброс опасной среды из аппаратуры, пожар, взрыв, повреждение близлежащего оборудования, развитие аварии не выходит за пределы предприятия. Среди персонала могут быть травмированные; возможна эвакуация населения и нанесение восполнимого ущерба окружающей среде, остановка производства более 10 суток.	7 - 8
Отказ вызывает разгерметизацию аппарата, выброс опасной среды из аппаратуры, пожар, развитие аварии не выходит за пределы технологической установки. Персонал может получить незначительные травмы; население – опасности нет; окружающая среда – ущерба нет; остановка производства более 5 суток.	5 - 6
Отказ вызывает разгерметизацию аппарата, выброс опасной среды из аппаратуры, пожар, развитие аварии не выходит за пределы технологического блока. Персонал может получить незначительные травмы; население – опасности нет; окружающая среда – ущерба нет; остановка производства более суток	3 - 4
Отказ вызывает незначительную разгерметизацию аппарата, загорание непосредственно в пределах аппарата. Персоналу, населению, окружающей среде угрозы нет; остановка производства менее суток.	1 - 2

Результаты расчетов средних рисков на интервале ($t = 0 \div 1000$ ч) приведены в таблице 2.9.2.

Таблица 2.9.2.

β		с СЗ	без СЗ
0.8	с восстановлением	-5.3	-12
	без восстановления	-3.9	-5.5
0.99	с восстановлением	-2.9	-12
	без восстановления	-2.6	-5.5
1	с восстановлением	-2.8	-12
	без восстановления	-2.5	-5.5

2.9.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

В технологии и ПК АСМ методы и средства автоматизированного марковского моделирования в настоящее время не реализованы.

2.9.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

Программный комплекс «Risk Spectrum» предназначен для выполнения ВАБ АЭС, т.е. для анализа показателей надежности и безопасности технических систем, включающих в свой состав тысячи единиц оборудования, могущих находиться в сотнях эксплуатационных состояний (режимов использования) и т.п. Естественно, что это накладывает определенные требования на используемое математическое и программное обеспечение.

Специалистами института «Атомэнергопроект» (г. Москва) производились исследования возможности использования марковских методов для решения указанного класса задач, см. например, Клемин А.И., Емельянов В.С., Морозов В.Б. Расчет надежности ядерных энергетических установок. Марковская модель. С.: Энергоиздат, 1982., Клемин А.И. Надежность ядерных энергетических установок. основы расчета. М.: Энергоатомиздат, 1987. В ходе этих исследований установлено, что для решения реальных задач ВАБ марковские методы практически не применимы вследствие ограничений на размерность соответствующих математических моделей.

Эти выводы подтверждаются исследованиями И.А. Рябинына, см. например, Рябинин И.А., Китушин Ю.Н. Надежность судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования. Л.: Судостроение, 1974. В данном труде указывается (см. стр. 174), что общее число состояний СЭС, рассмотренной нами в разделе 2.1, составляет 32 768. Полный набор всех путей, выраженных в СДНФ, насчитывает 2410 членов, из которых 92 являются кратчайшими. Такие цифры вызывают естественное сомнение в возможности построения марковского графа переходов для такой системы, а также в возможности получения аналитического решения, имеющего приемлемую точность. В любом случае, требуемый результат (расчет показателей надежности СЭС) может быть достигнут с меньшими усилиями при использовании альтернативных методов.

Учитывая назначение кода «Risk Spectrum», а также то, что реальные системы АЭС значительно сложнее СЭС, рассмотренной в п. 2.1, и основываясь на неофициальной информации специалистов СПБАЭП о планах развития данного кода, можно утверждать, что классы задач, рассмотренные выше в данном разделе и решенные модулем марковского анализа (Relex Markov) в технологии «Risk Spectrum» реализованы не будут ввиду отсутствия практической надобности.

Сводная таблица результатов раздела 2.9. " Расчет надежности и эффективности системы с защитой "			
Relax FMEA/FMECA		ПК АСМ	Risk Spectrum
1		2	3
Балльная оценка ущербов произведена по результатам проведения экспертами качественного анализа видов и последствий отказов			
Характеристика последствий отказа		ВЗ, баллы	
Отказ вызывает разгерметизацию аппарата, выброс опасной среды из аппаратуры, пожар, взрыв, образование токсичного облака, цепное развитие аварии на промплощадке предприятия и за его пределами. Среди персонала и населения могут быть жертвы; есть необходимость эвакуации населения; окружающая среда получит значительный ущерб; объект – полное разрушение; остановка производства может быть 1 месяц и более.		9 - 10	
Отказ вызывает разгерметизацию аппарата, выброс опасной среды из аппаратуры, пожар, взрыв, повреждение близлежащего оборудования, развитие аварии не выходит за пределы предприятия. Среди персонала могут быть травмированные; возможна эвакуация населения и нанесение восполнимого ущерба окружающей среде, остановка производства более 10 суток.		7 - 8	
Отказ вызывает разгерметизацию аппарата, выброс опасной среды из аппаратуры, пожар, развитие аварии не выходит за пределы технологической установки. Персонал может получить незначительные травмы; население – опасности нет; окружающая среда – ущерба нет; остановка производства более 5 суток.		5 - 6	
Отказ вызывает разгерметизацию аппарата, выброс опасной среды из аппаратуры, пожар, развитие аварии не выходит за пределы технологического блока. Персонал может получить незначительные травмы; население – опасности нет; окружающая среда – ущерба нет; остановка производства более суток		3 - 4	
Отказ вызывает незначительную разгерметизацию аппарата, загорание непосредственно в пределах аппарата. Персоналу, населению, окружающей среде угрозы нет; остановка производства менее суток.		1 - 2	
Результаты расчетов средних рисков на интервале (t = 0 + 1000ч)			
β		с СЗ	без СЗ
0.8	с восстановлением	-5.3	-12
	без восстановления	-3.9	-5.5
0.99	с восстановлением	-2.9	-12
	без восстановления	-2.6	-5.5
1	с восстановлением	-2.8	-12
	без восстановления	-2.5	-5.5
		не выполняется	не выполняется

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.9

Выводы специалистов ИПУ РАН

В разделе рассматривалась довольно сложная модель, учитывающая последовательность возникновения отказов, некоторые виды несовместности и различные уровни эффективности функционирования (в частности, ущерба). Задача решена только на ПК Relex.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. В технологии и ПК АСМ методы и средства автоматизированного марковского моделирования в настоящее время не реализованы.
2. Вместе с тем, хотелось бы отметить, что специалистами Компании в настоящее время получены первые успешные решения задач автоматического построения графов переходов состояний марковских моделей большой размерности, расчета параметров переходов и получения с помощью ЭВМ соответствующих матриц переходных вероятностей, лямбда-матриц, систем алгебраических и дифференциальных уравнений. Исходными данными в решении задач данного класса выступают те же схемы функциональной целостности, логические критерии функционирования и параметры элементов. Размеры автоматически формируемых марковских моделей достигают нескольких сотен состояний и нескольких десятков и сотен тысяч переходов. В настоящее время марковские модели могут автоматически строиться без учета и с учетом групп несовместных событий.
3. Разработаны и автоматизированы методы расчета на основе автоматически формируемых цепей Маркова условных законов живучести и условных законов поражения систем, подвергающихся заданным последовательностям различных поражающих воздействий.
4. Методы и средства автоматического построения и расчета высокоразмерных марковских моделей с непрерывным временем находятся в стадии разработки и не внедрены в программные комплексы автоматизированного структурно-логического моделирования.
5. Мы считаем данное направление работ актуальным и перспективным.

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Пример 2.9, демонстрирующий применение марковских процессов для учета последовательности возникновения отказов, решен только с помощью ПК «Relex».
2. В технологии АСМ выполнены теоретические проработки и созданы первые программные реализации некоторых разделов марковского моделирования. Решение задачи, рассмотренной в данном примере в ПК АСМ в настоящее время не реализованы.
3. В связи с отсутствием практической надобности в решении задач, подобных рассмотренной в данном разделе, при производстве ВАБ АЭС, реализация их в технологии «Risk Spectrum» не планируется.

2.10. Расчет надежности вычислительной системы с синхронизатором

2.10.1. Описание задачи

Рассматривается вычислительная система (рис. 2.10.1), состоящая из двух параллельно работающих, взаимно резервирующих друг друга вычислительных устройств (1,2) и синхронизатора (3).

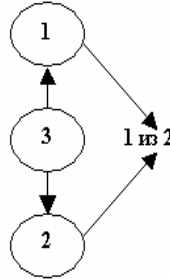


Рис. 2.10.1 Структурная схема вычислительной системы с синхронизатором

Реализуется резервирование основного устройства (в качестве которого может быть как 1, так и 2) другим, резервным. Синхронизатор поддерживает параллельную, одновременную работу вычислительных устройств и необходим для мгновенного включения в работу резервного при отказе основного. При отказе синхронизатора система может работать только на одном, основном (в данный момент времени) вычислительном устройстве. В этом случае система становится нерезервированной. Особенностью модели “надежностного поведения” является необходимость учета последовательности возникновения отказов. При отказе основного устройства, а затем синхронизатора, система продолжает работать на резервном устройстве, так как в момент отказа основного устройства синхронизатор был работоспособен и обеспечил включение резерва. Если же сначала отказывает синхронизатор, а затем основное устройство, то система попадает в состояние отказа. В примере рассматривается модель без восстановления.

2.10.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Модель надежности системы в виде марковского графа состояний и переходов приведена на рис. 2.10.2.

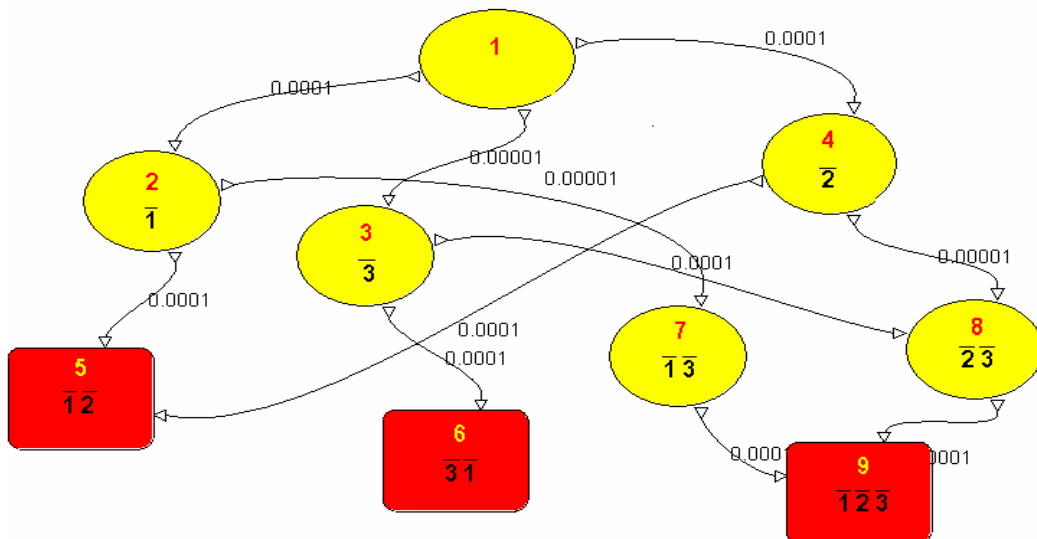


Рис.2.10.2. Марковская модель вычислительной системы с синхронизатором

Вероятности работоспособных состояний, полученные из уравнений Колмогорова-Чепмена, имеют вид:

$$\begin{aligned}
P_1(t) &= \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \cdot t\}; \\
P_2(t) &= \exp\{-(\lambda_2 + \lambda_3) \cdot t\} \cdot (1 - \exp\{-\lambda_1 \cdot t\}); \\
P_3(t) &= \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot t\} \cdot (1 - \exp\{-\lambda_3 \cdot t\}); \\
P_4(t) &= \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_3) \cdot t\} \cdot (1 - \exp\{-\lambda_2 \cdot t\}); \\
P_7(t) &= \lambda_3 \cdot \left(\frac{\exp\{-\lambda_2 \cdot t\} - \exp\{-(\lambda_2 + \lambda_3) \cdot t\}}{\lambda_3} - \frac{\exp\{-\lambda_1 \cdot t\} - \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \cdot t\}}{\lambda_1 + \lambda_3} \right); \\
P_8(t) &= \exp\{-\lambda_1 \cdot t\} \cdot (1 - \exp\{-\lambda_2 \cdot t\}) \cdot (1 - \exp\{-\lambda_3 \cdot t\}).
\end{aligned}
\tag{2.10.1}$$

Вероятность безотказной работы системы на интервале (0,t) равна

$$P_{6/o}(t) = \sum_{i \in \{4,7,8\}} P_i(t).
\tag{2.10.2}$$

Расчет на Relex Markov был проведен для $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.0001$, $\lambda_3 = 0.00001$, $t = 8760$ ч.

Результаты расчета во времени приведены в таблице на рисунке 2.10.3 (рисунок получен копированием экрана результатов вычислений модуля Relex Markov).

Таблица 2.4.

Time	Reliability
0	1.000000
876.00	0.992635
1752.00	0.973032
2628.00	0.944377
3504.00	0.909228
4380.00	0.869623
5256.00	0.827181
6132.00	0.783175
7008.00	0.738596
7884.00	0.694210
8760.00	0.650595

Рис. 2.10.3. Результаты расчетов вероятности безотказной работы

Средняя наработка до отказа системы (MTTF) = **14761.904762**ч.

2.10.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

Класс задач Марковского моделирования в технологии и ПК АСМ в настоящее время не реализован.

Однако выполненные к настоящему времени разработки позволяют решить данную задачу анализ системы с синхронизацией используя новые средства так называемого комбинаторно-последовательного автоматизированного логико-вероятностного моделирования систем.

Сначала получим приближенное решение раной задачи традиционными комбинаторными методами логико-вероятностного моделирования. Затем найдем точное решение, используя АСМ-утилиту расчета логических последовательностей.

Пример 1. Приближенное решение задачи расчета надежности системы с синхронизатором с помощью ПК АСМ

Для решения данного примера разработана СФЦ, представленная на рис.2.10.4.

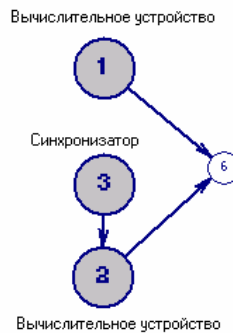


Рис.2.10.4. СФЦ вычислительного устройства с синхронизатором

Решая эту задачу с помощью ПК АСМ с параметрами $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.0001$ (1/час), $\lambda_3 = 0.00001$ (1/час), $t = 8760$ ч., получаем.

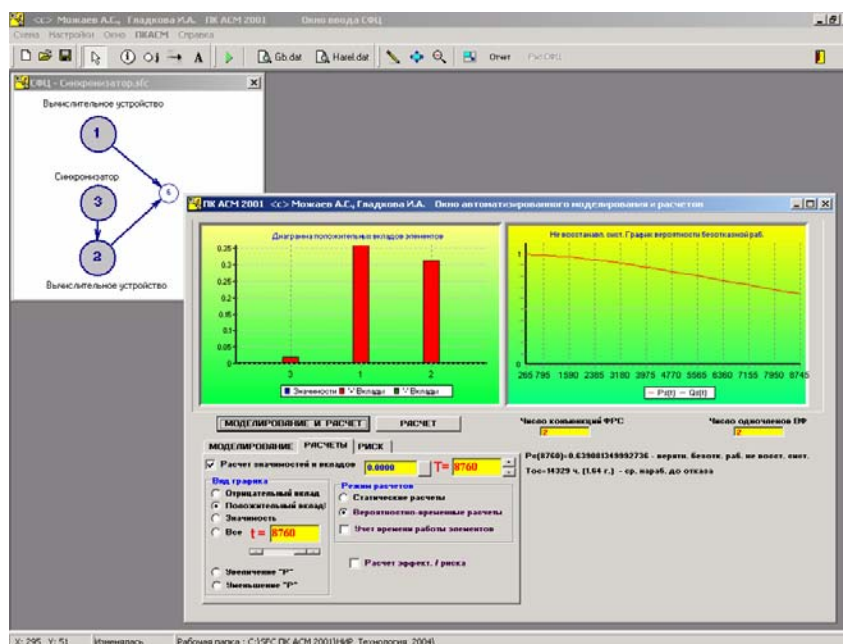


Рис.2.10.4. Результаты приближенного решения задачи с синхронизатором

Результаты расчетов составили

Вероятность безотказной работы системы $P_c(8760) = 0.639081349993$ (2.10.3)

Средняя наработка до отказа системы (MTTF) = 14329 ч.

Оба результата близки (с занижением) к показателям надежности данной системы, полученным с помощью модуля Relex Markov ($P_c(8760) = 0.650595$ и 14761.904762 ч.).

Пример 2. Точное решение задачи расчета надежности системы с синхронизатором в технологии АСМ.

Для данного простого примера очевидно, что в полученном ранее решении (см. рис. 2.4.10) не учтена одна последовательность отказов элементов, не приводящая к отказу исследуемой системы в целом. Она соответствует событию, когда сначала отказал элемент 1, а только потом, уже после выполнения функции синхронизации и передачи управления вычислительному устройству 2, отказал синхронизатор 3. Это событие представлено на графе переходов (см. рис.2.10.2) состоянием с номером 7 ($\bar{1} \cdot \bar{3}$), которое является работоспособным, в отличие от отказового состояния 6 ($\bar{3} \cdot \bar{1}$) рассматриваемой системы. В технологии АСМ указанное дополнительное состояние может быть учтено следующей СФЦ следующего вида.

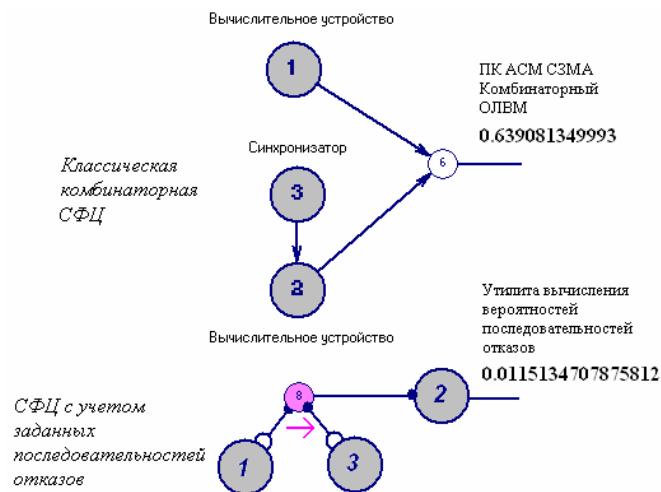


Рис.2.10.5. СФЦ комбинаторно-последовательной системы с синхронизатором

Ранее, на основе классической комбинаторной СФЦ системы с синхронизатором ранее была вычислена приближенная вероятность ее безотказной работы (2.10.3), которая составила **0.639081349993**.

Вычисляя с помощью уже описанной ранее утилиты моделирования и расчета последовательностей отказов (см. §2.8.3) получаем следующую вероятность работоспособного состояния $\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot x_2$ (см. марковское состояние 7 на рис.2.10.2)

$$p(\{x''_1 - > x''_3\} \cdot x_2) = 0.0115134707875812$$

Суммируя указанные вероятности получаем точное значение вероятности безотказной работы рассматриваемой системы с синхронизацией

$$P_c(8760) = 0.6505948207805812 \quad (2.10.4)$$

Эта вероятность точно совпадает с результатом решения, которое было получено с помощью модуля Relex Markov (см. рис.2.10.3).

Результаты расчетов надежности системы с синхронизатором средствами технологии АСМ для различных значений наработки приведены в следующей таблице.

Наработка (час)	Вероятность безотказной работы		
	приближенный расчет	последовательность	точный расчет
0	1	-	-
1	0.999999989001	4.99930024147034E-10	0.99999998950093
876	0.992295200305	0.000339483513030663	0.992634683818031
1752	0.971829454290	0.00120204902259067	0.973031503312591
2628	0.941981784205	0.0023952381177961	0.944377022322796
3504	0.905454731121	0.00377283730966169	0.909227568430662
4380	0.864397613522	0.00522546932907408	0.869623082851074
5256	0.820508227068	0.00667294611211197	0.827181173180112
6132	0.775116683135	0.00805806831469244	0.783174751449692
7008	0.729254455790	0.00934161112588398	0.738596066915884
7884	0.683711184964	0.0104982816481769	0.694209466612177
8760	0.639081349993	0.0115134707875812	0.650594820780581

Все расчеты по предложенной методике для других наработок совпали с данными полученными Relex Markov и приведенными в таблице на рис.2.10.3.

2.10.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

Учитывая назначение кода «Risk Spectrum», а также то, что реальные системы АЭС обладают значительной сложностью, и основываясь на неофициальной информации специалистов СПбАЭП о планах развития данного кода, можно утверждать, что классы задач, рассмотренные выше в данном разделе и решенные модулем марковского анализа (Relex Markov) в технологии «Risk Spectrum» реализованы не будут ввиду отсутствия практической надобности.

Сводная таблица результатов раздела 2.10. " Расчет надежности вычислительной системы с синхронизатором "				
Пример	Наработка t (час)	Результаты моделирования и расчетов		
		Relex Markov	ПК АСМ	Risk Spectrum
1	2	3	4	5
Рассматривается вычислительная система (рис. 2.10.1), состоящая из двух параллельно работающих, взаимно резервирующих друг друга вычислительных устройств (1,2) и синхронизатора (3). Особенностью модели "надежностного поведения" является необходимость учета последовательности возникновения отказов. $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.0001$, $\lambda_3 = 0.00001$, $t = 0-8760ч.$	876	0.992635	0.992634683818031	не вычисляются
	1752	0.973032	0.973031503312591	
	2628	0.944377	0.944377022322796	
	3504	0.909228	0.909227568430662	
	4380	0.869623	0.869623082851074	
	5256	0.827181	0.827181173180112	
	6132	0.783175	0.783174751449692	
	7008	0.738596	0.738596066915884	
	7884	0.694210	0.694209466612177	
	8760	0.650595	0.650594820780581	

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.10

Выводы специалистов ИПУ РАН

В разделе рассмотрен еще один случай возникновения необходимости моделирования последовательности отказов. Задача решена только на ПК Relex и ПК АСМ.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

Многие практически важные задачи системного анализа могут быть решены только методами и средствами Марковского моделирования. Главным сдерживающим фактором здесь становится проблема формализованной постановки задач, обусловленная высокой трудоемкостью построения графов переходов состояний систем большой размерности. Поэтому наряду с традиционными методами и средствами автоматизации процессов Марковского моделирования все более актуальной становится автоматизация процессов постановки задач Марковского моделирования, и, прежде всего, построения собственно графов переходов состояний. Эти разработки в плановом порядке выполняются в СПИК СЗМА.

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Пример 2.10, демонстрирующий применение марковских процессов для учета последовательности возникновения отказов, решен помощью ПК «Relex» и ПК АСМ с дополнительной утилитой моделирования и расчета вероятностей комбинаторно-последовательных событий.

2. В связи с отсутствием практической надобности в решении задач, подобных рассмотренной в данном разделе, при производстве ВАБ АЭС, реализация их в технологии «Risk Spectrum» не планируется.

2.11. Анализ различных сценариев аварий на установке первичной переработки нефти

2.11.1. Описание задачи

В Методических указаниях Госгортехнадзора РФ РД 03-418-01 на стр. 31 дан пример общей постановки задач этого класса и приведено дерево событий развития аварии на установке первичной переработки нефти. Этот пример доработан А.С. Можаяевым, в частности, каждому разветвлению процесса возможных вариантов развития аварийной ситуации (выброс нефти) сопоставлены обозначения соответствующих бинарных событий, указаны их номера и собственные вероятности, вычисленные на основе данных из РД 03-418-01. Кроме этого, восемь возможных вариантов конечных состояний аварии системы сгруппированы в три подмножества, каждому из которых сопоставлена характеристика соответствующего уровня ущерба, выраженного в условных единицах. Доработанное дерево событий представлено на рис.2.11.1.

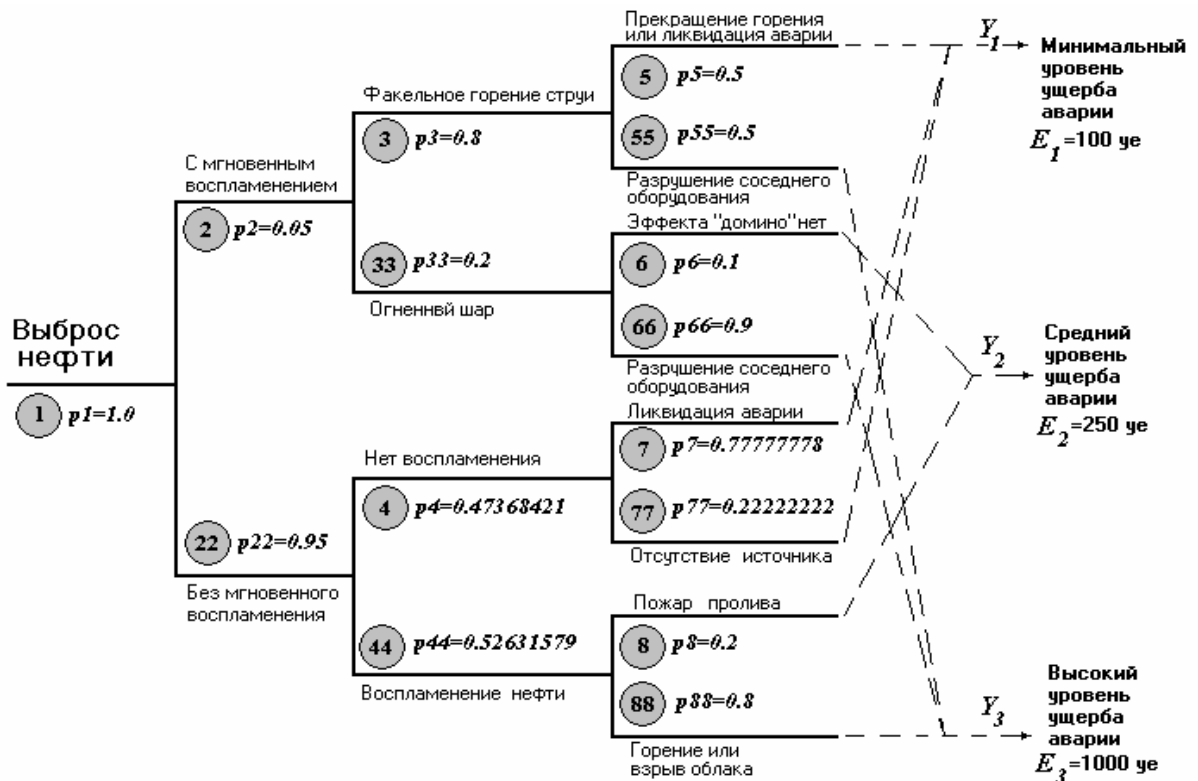


Рис.2.11.1. Дерево событий аварии на установке первичной переработке нефти

Дадим некоторые пояснения к указанному дереву событий. Иницирующее событие (ИС) аварии происходит с вероятностью, равной 1. Тяжесть последствий аварии определяется возможными путями ее развития. Таких путей можно выделить 8:

1. Выброс нефти – исключение ее мгновенного воспламенения – исключение последующего (через какое-то время) возгорания – ликвидация аварии (очевидно, сбор пролившейся нефти). Ущерб от аварии минимален.

2. Выброс нефти – исключение ее мгновенного воспламенения – исключение последующего (через какое-то время) возгорания – наличие какого-то количества нефти на территории установки. При этом предполагается, что, в связи с отсутствием источника возгорания (открытый огонь, сварка и т.п.), пожар возникнуть не может. Очевидно, что

через некоторое время нефть уйдет в почву. Ущерб от аварии также можно считать минимальным.

3. Выброс нефти – исключение ее мгновенного воспламенения – возникновение последующего (через какое-то время) возгорания – горение разлитой нефти (пожар пролива), сопровождающееся сравнительно слабым негативным воздействием на окружающую среду (средний уровень ущерба).

4. Выброс нефти – исключение ее мгновенного воспламенения – возникновение последующего (через какое-то время) возгорания – горение или взрыв возникшего при разливе нефти облака взрывоопасных компонентов, сопровождающееся сравнительно более сильным негативным воздействием на окружающую среду (высокий уровень ущерба).

5. Выброс нефти – мгновенное ее воспламенение – факельное горение пролитой нефти – прекращение горения (вследствие выгорания всего количества нефти) или ликвидация аварии, сопровождающееся минимальным негативным воздействием на окружающую среду.

6. Выброс нефти – мгновенное ее воспламенение – факельное горение пролитой нефти – разрушение соседнего оборудования вследствие невозможности (по каким-то причинам) ликвидации аварии, сопровождающееся высоким уровнем ущерба.

7. Выброс нефти – мгновенное ее воспламенение – возникновение не факела, а огненного шара из горячей нефти – выгорание пролитой нефти без воздействия на соседнее оборудование. Средний уровень ущерба.

8. Выброс нефти – мгновенное ее воспламенение – возникновение не факела, а огненного шара из горячей нефти – выгорание пролитой нефти с воздействием на соседнее оборудование (эффект «домино»). Высокий уровень ущерба.

Необходимо рассчитать вероятность перехода установки в каждое состояние и величину риска (произведения вероятности перехода в конкретное конечное состояние установки на величину ущерба, характерного для данного состояния) для каждого состояния.

2.11.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Тестовый расчет проведен в модуле Relex Деревьев Событий (Relex Event Tree).
Дерево событий и результаты расчета представлены на рис. 2.11.2.

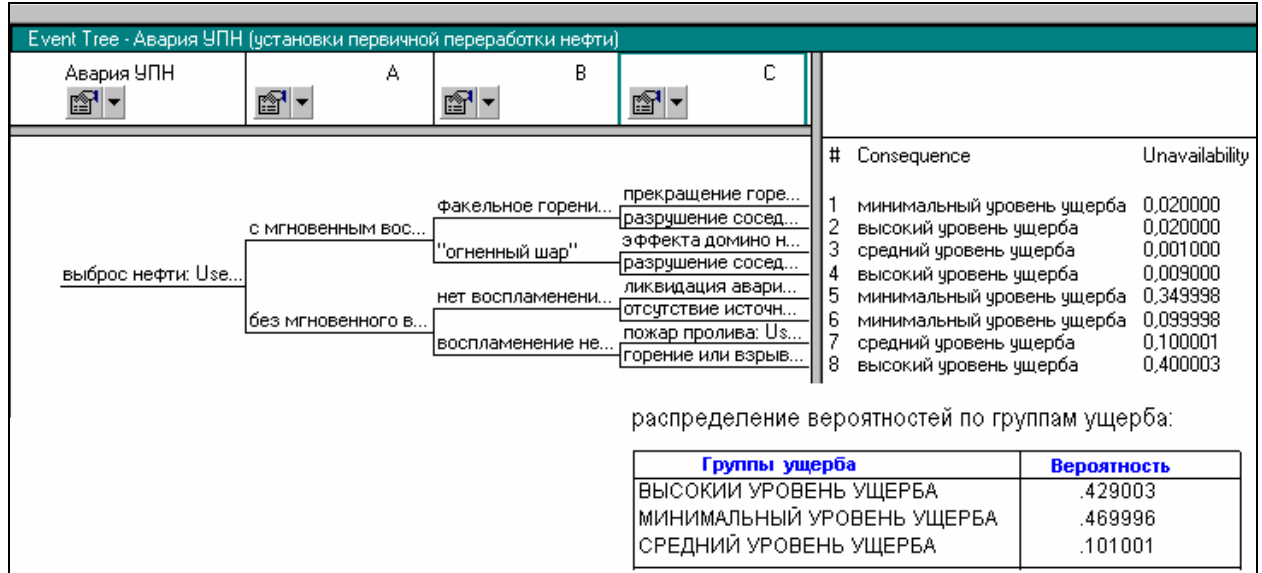


Рис. 2.11.2. Дерево событий аварий на установке первичной переработки нефти

2.11.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

Приведенные в п. 2.11.1 данные позволяют представить исходное дерево событий аварии на установке первичной переработки нефти с помощью схемы функциональной целостности, необходимой для применения ПК АСМ. Эта СФЦ приведена на рис.2.11.3.

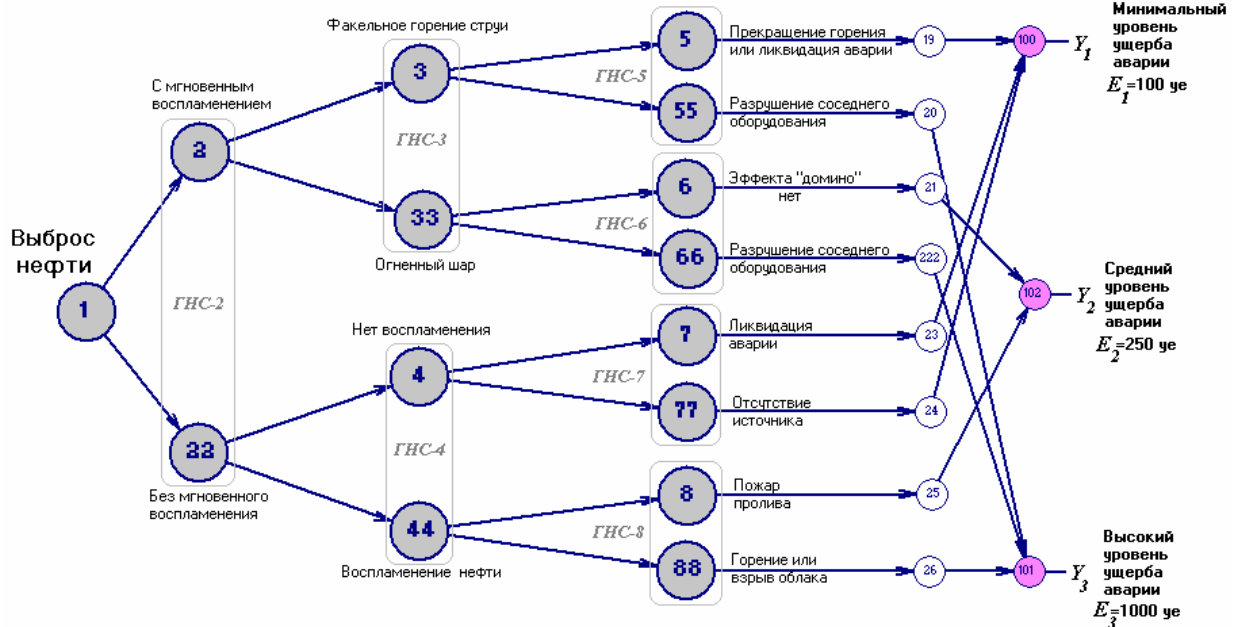


Рис.2.11.3. СФЦ дерева событий аварий на установке первичной переработки нефти

В данной СФЦ для представления процесса развития аварии, соответствующего исходному дереву событий, использован аппарат групп несовместных событий (ГНС). Каждое разветвление исследуемого процесса представлено в графе СФЦ полной группой из двух несовместных прямых исходов соответствующего элементарного (бинарного) события. В рассматриваемом примере дерево событий, изображенное на рис.2.11.3, содержит семь разветвлений. Каждому из разветвлений сопоставлена группа из двух несовместных событий. На рис. 2.11.3 они обозначены функциональными вершинами с номерами: {2, 22}, {3, 33}, {4, 44}, {5, 55}, {6, 66}, {7, 77}, {8, 88}. ГНС позволяют строить СФЦ исследуемого сценария развития аварии (см. рис.2.11.1) в форме, которая является прямым подобием исходного графа дерева событий. Это существенно облегчает постановку задач данного класса в технологии АСМ.

Пример 1. Анализ различных сценариев аварий на установке первичной переработки нефти

Для вероятностного анализа различных вариантов заданного деревом событий сценария развития аварии на установке первичной переработки нефти выполняются следующие действия.

1. Подготовленная СФЦ дерева событий и параметры элементов вводятся в ПК АСМ.
2. По каждому из выходов сценария развития аварии (на рис.2.11.1 и рис.2.11.2 их восемь) с помощью ПК АСМ решается задача автоматизированного моделирования и расчета вероятности данного варианта развития аварии.

В таблице 2.11.1 приведены вероятности вариантов развития аварии рассматриваемого примера анализа аварии на установке первичной переработки нефти.

Таблица 2.11.1.

№ варианта	ЛКФ	Вероятность варианта развития аварии
1	Y_{19}	0.02
2	Y_{20}	0.02
Э 3	Y_{21}	0.001
4	Y_{222}	0.009
5	Y_{23}	0.35
6	Y_{24}	0.09999999999999999
7	Y_{25}	0.1
8	Y_{26}	0.4

Эти результаты практически совпали с решениями данной задачи, полученными с помощью модуля Relex Деревьев событий (Relex Event Tree) (см. рис.2.11.2) и с помощью ПК Risk Spectrum (см. рис.2.11.7).

Пример 2. Автоматизированное моделирование и расчет ожидаемого ущерба от аварии на установке первичной переработки нефти

В Методических указаниях РД 03-418-01 Госгортехнадзора РФ под ожидаемым ущербом понимается математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии. К сожалению, результатов моделирования и оценки ожидаемого ущерба для примера аварии на установке первичной переработки нефти Методических указаниях не приводится.

Поэтому, для моделирования и оценки математического ожидания величины ущерба от аварии, выходы конечных событий на рис.2.11.1 и рис.2.11.2 сгруппированы в три подмножества Y_1, Y_2, Y_3 , каждому из которых сопоставлена характеристика соответствующего уровня ущерба E_1, E_2, E_3 , выраженного в условных единицах.

Автоматизированное математическое моделирование и расчет математического ожидания величины ущерба в ПК АСМ выполняется на основе составного логического критерия, который для данной задачи имеет следующий вид

$$WR_C = E1 * p\{y100\} + E2 * p\{y102\} + E3 * p\{y101\} \quad (2.11.1)$$

На рис.2.11.4 приведены общие результаты автоматизированного моделирования и расчета ожидаемого ущерба возможной аварии на установке первичной переработки нефти, полученные с помощью ПК АСМ 2001.

Математическая модель и результаты расчета математического ожидания величины ущерба от возможной аварии составили:

$$WR_C = E1 * \left(\begin{array}{l} p_1 p_2 p_3 p_5 + \\ + p_1 p_4 p_{22} p_{77} + \\ + p_1 p_4 p_7 p_{22} \end{array} \right) + E2 * \left(\begin{array}{l} p_1 p_2 p_6 p_{33} + \\ + p_1 p_8 p_{22} p_{44} \end{array} \right) + E3 * \left(\begin{array}{l} p_1 p_2 p_{33} p_{66} + \\ + p_1 p_2 p_3 p_{55} + \\ + p_1 p_{22} p_{44} p_{88} \end{array} \right) = \quad (2.11.2)$$

$$= 100 * 0.47 + 250 * 0.101 + 1000 * 0.429 = 501.29 \text{ ye}$$

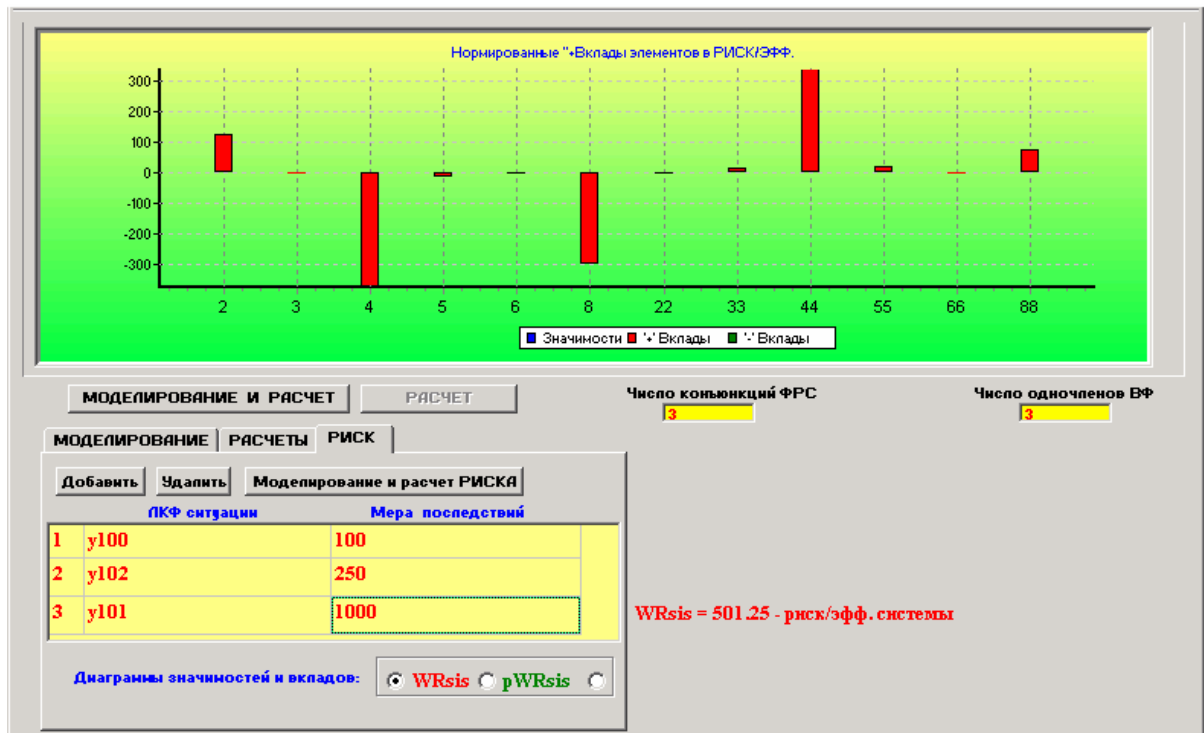


Рис.2.11.4. Моделирование и оценка ожидаемого ущерба на ПК АСМ 2001

Приведенные в (2.11.2) результаты моделирования и расчета на ПК АСМ распределения вероятностей по группам ущерба составили:

1. Высокий уровень ущерба: $p\{y101\} = 0.429$;
2. Минимальный уровень ущерба: $p\{y100\} = 0.47$;
3. Средний уровень ущерба: $p\{y101\} = 0.101$.

Эти результаты совпали с решениями, выполненными с помощью модуля Relex Event Tree (см. рис.1.26).

Вычисленные вклады элементов в показатель риска рассматриваемой системы (см. диаграмму на рис.2.11.4) имеют следующие значения:

$$\begin{aligned}
 \beta_2^{+(W_c)} &= +123.75ye; & \beta_{22}^{+(W_c)} &= -6.51ye; \\
 \beta_3^{+(W_c)} &= -3.75ye; & \beta_{33}^{+(W_c)} &= +15.0ye; \\
 \beta_4^{+(W_c)} &= -357.0ye; & \beta_{44}^{+(W_c)} &= +337.5ye; \\
 \beta_5^{+(W_c)} &= -18.0ye; & \beta_{55}^{+(W_c)} &= +18.0ye; \\
 \beta_6^{+(W_c)} &= -6.75ye; & \beta_{66}^{+(W_c)} &= +0.75ye; \\
 \beta_7^{+(W_c)} &= 0.0ye; & \beta_{77}^{+(W_c)} &= 0.0ye; \\
 \beta_8^{+(W_c)} &= -300.0ye; & \beta_{88}^{+(W_c)} &= +75.0ye.
 \end{aligned}
 \tag{2.11.3}$$

Следует отметить, что использование ГНС позволяет сразу вычислять как положительные, так и отрицательные вклады отдельных элементарных событий 2, 3, 4, ..., 8, определяющих различные варианты процесса развития аварии. В (2.11.3) вклады элементов 2, 3, 4, ..., 8 являются положительными и характеризуют влияние на значение риска аварии W_c мероприятий по увеличению до 1.0 вероятностей исходов "верхних" ответвлений процесса развития аварии (см. рис.2.11.1 и рис.2.11.2). Вклады противоположных исходов 22, 33, 44, ..., 88 соответствующих ГНС, приведенные в (2.11.3), точно равны отрицатель-

ным вкладом тех же элементов 2, 3, 4, ..., 8 рассматриваемого процесса развития аварии. Они определяют влияние на значение риска W_C мероприятий по уменьшению вероятностей отдельных событий до 0.0. На основе результатов (2.11.3) можно заключить, что наибольшее влияние на изменение риска аварии имеет событие с номером 4, связанное с мероприятиями по недопущению воспламенения нефти после ее выброса. Если это воспламенение предотвратить, то в совокупности с другими возможными вариантами развития аварии, ее риск (по показателю нанесенного ущерба) уменьшится на максимальную величину, составляющую 357 у.е. Если вероятность противоположного исхода (воспламенения) по каким либо причинам возрастет, то математическое ожидание ущерба может увеличиться на 337.5 у.е.

Из анализа полученных результатов следует, что существенно сократить риск (до 300.0 у.е.) могут мероприятия, связанные с недопущением исхода 88 горения или взрыва облака после воспламенения нефти. Все остальные отдельные события аварии на установке первичной переработки нефти оказывают, в среднем, существенно меньшее влияние на значение ожидаемого ущерба от данного вида аварии на установке первичной переработки нефти.

2.11.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

На рисунках 2.11.5 – 2.11.7 представлены результаты моделирования и расчетов для различных сценариев аварии на установке первичной переработки нефти (УППН), выполненные с помощью кода «Risk Spectrum». Выполнено 3 варианта расчетов, отличающихся способами учета вероятности успешного (т.е. в менее опасном направлении) развития аварии на том или ином этапе.

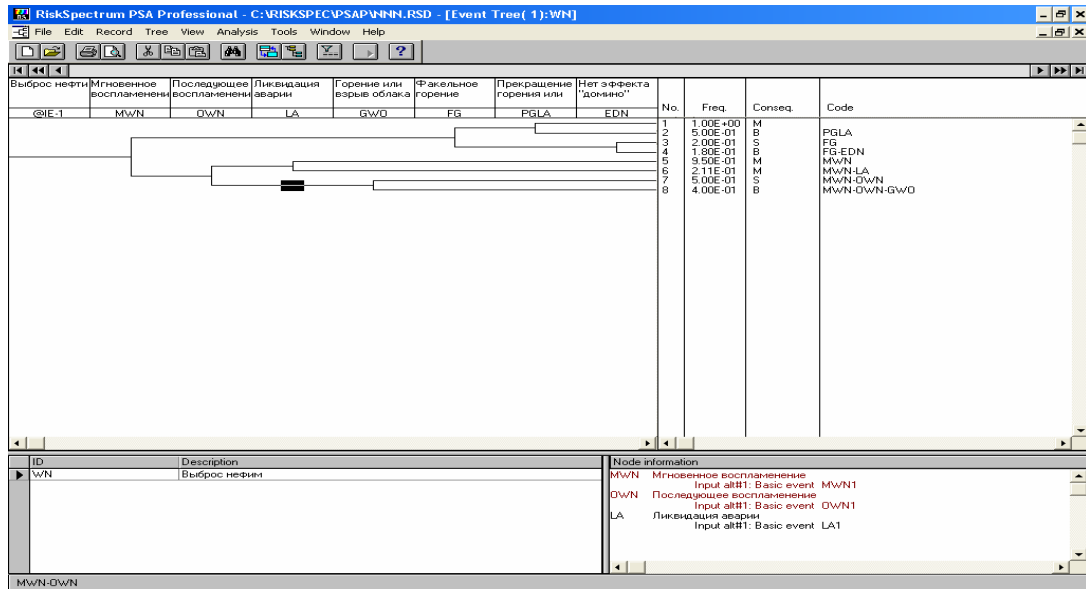


Рис. 2.11.5. Дерево событий для аварии на УППН при обработке успеха по правилу «Ignore ET success» («Пропуск успеха ДС»)

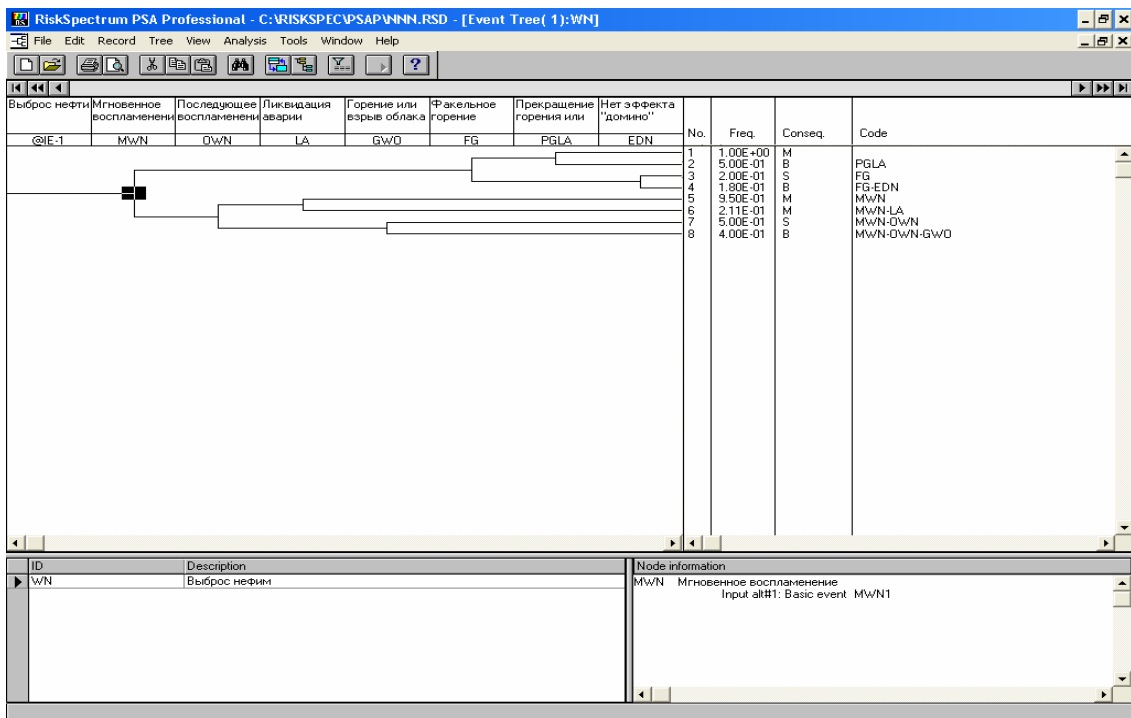


Рис. 2.11.6. Дерево событий для аварии на УППН при обработке успеха по правилу «Logical ET success» («Логический успех ДС»)

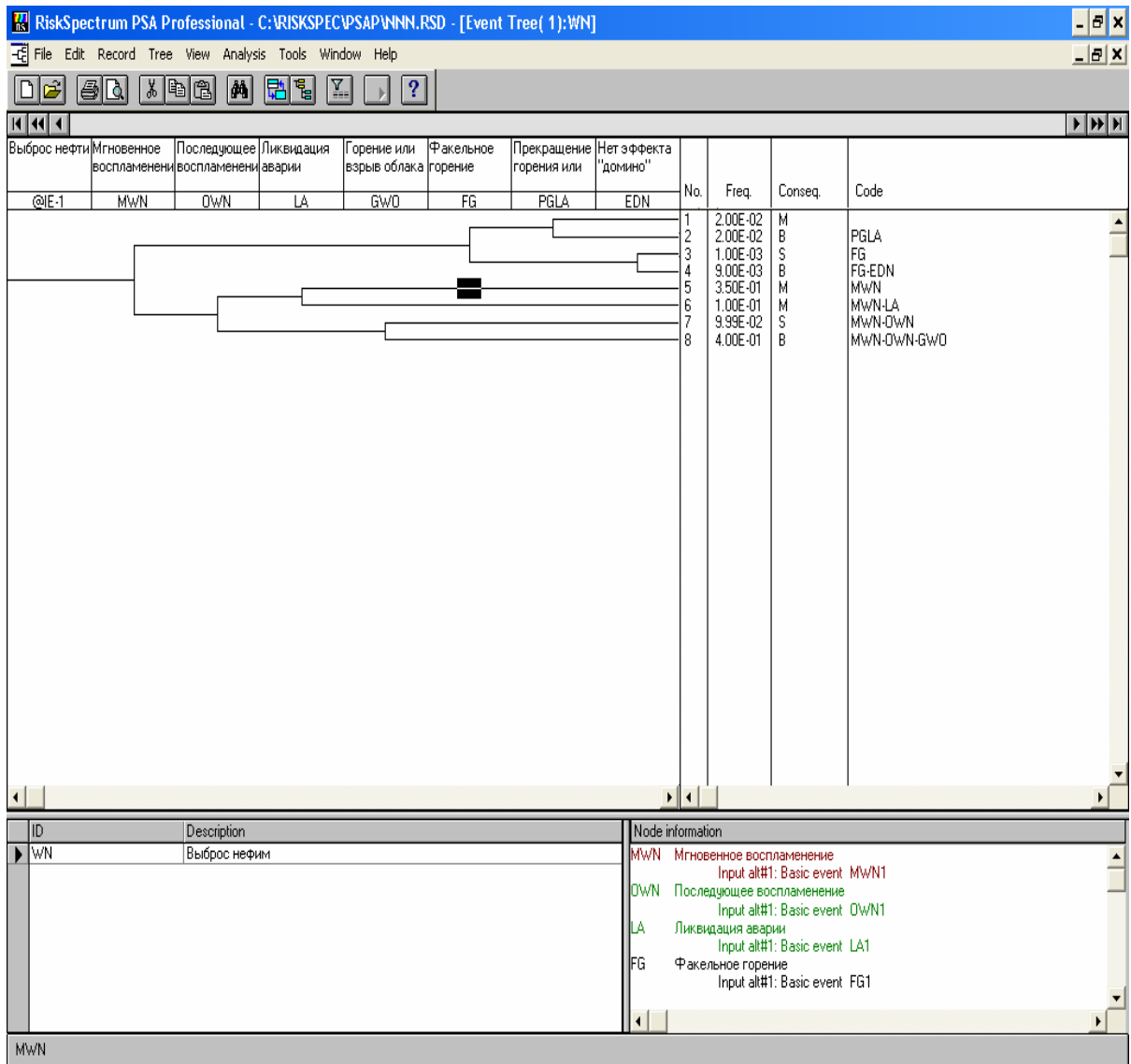


Рис. 2.11.7. Дерево событий для аварии на УППН при обработке успеха по правилу «Log. and simple quant.» («Логическая и простая квантификация»)

Как следует из этих рисунков, результаты расчета вероятностей реализации конечных состояний установки полностью совпали (с учетом точности округления) с результатами, полученными с помощью двух других кодов, только при третьем варианте расчетов.

На рисунках 2.11.8 -2.11.10 представлены результаты расчета последствий для групп состояний с одинаковым уровнем ущерба. Как следует из этих рисунков, полученные результаты не совпадают не только с результатами, полученными с помощью других кодов, но и с результатами, представленными на рис. 2.11.7 (имеется в виду то, что при суммировании вероятностей реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба, см. рис.2.11.7, мы получаем полное совпадение результатов с результатами, полученными с помощью других кодов).

RiskSpectrum PSA Professional - C:\RISKSPEC\PSAP\WNN.RSD - [Consequence Results(2):B]

File Edit Record View Analysis Tools Window Help

ID	Description	Calc. type	Mean	5th perc.	Median	95th perc.
B		Q	7.54E-01	7.54E-01	7.54E-01	7.54E-01
M		Q	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
S		Q	6.00E-01	6.00E-01	6.00E-01	6.00E-01

Top event probability Q = 7.539E-01

No.	Prob.	%	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
1	5.000E-01	66.32	PGLA1	WN				
2	3.998E-01	53.03	GW01	MwN1	DwN1	WN		
3	1.800E-01	23.88	EDN1	FG1	WN			

MCS System Mod.MCS BE Gr. Bas.ev. CDF CCF Gr. PDF Param. Time-dep. Attrib. Stat. Comp. Chart

Рис. 2.11.8. Результаты расчетов вероятности реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба при обработке успеха по правилу «Ignore ET success» («Пропуск успеха ДС»)

RiskSpectrum PSA Professional - C:\RISKSPEC\PSAP\WNN.RSD - [Consequence Results(2):M]

File Edit Record View Analysis Tools Window Help

ID	Description	Calc. type	Mean	5th perc.	Median	95th perc.
B		Q	7.54E-01	7.54E-01	7.54E-01	7.54E-01
M		Q	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
S		Q	6.00E-01	6.00E-01	6.00E-01	6.00E-01

Top event probability Q = 1.000E+00

No.	Prob.	%	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
1	1.000E+00	100.00	WN					

MCS System Mod.MCS BE Gr. Bas.ev. CDF CCF Gr. PDF Param. Time-dep. Attrib. Stat. Comp. Chart

Рис. 2.11.9. Результаты расчетов вероятности реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба при обработке успеха по правилу «Logical ET success» («Логический успех ДС»)

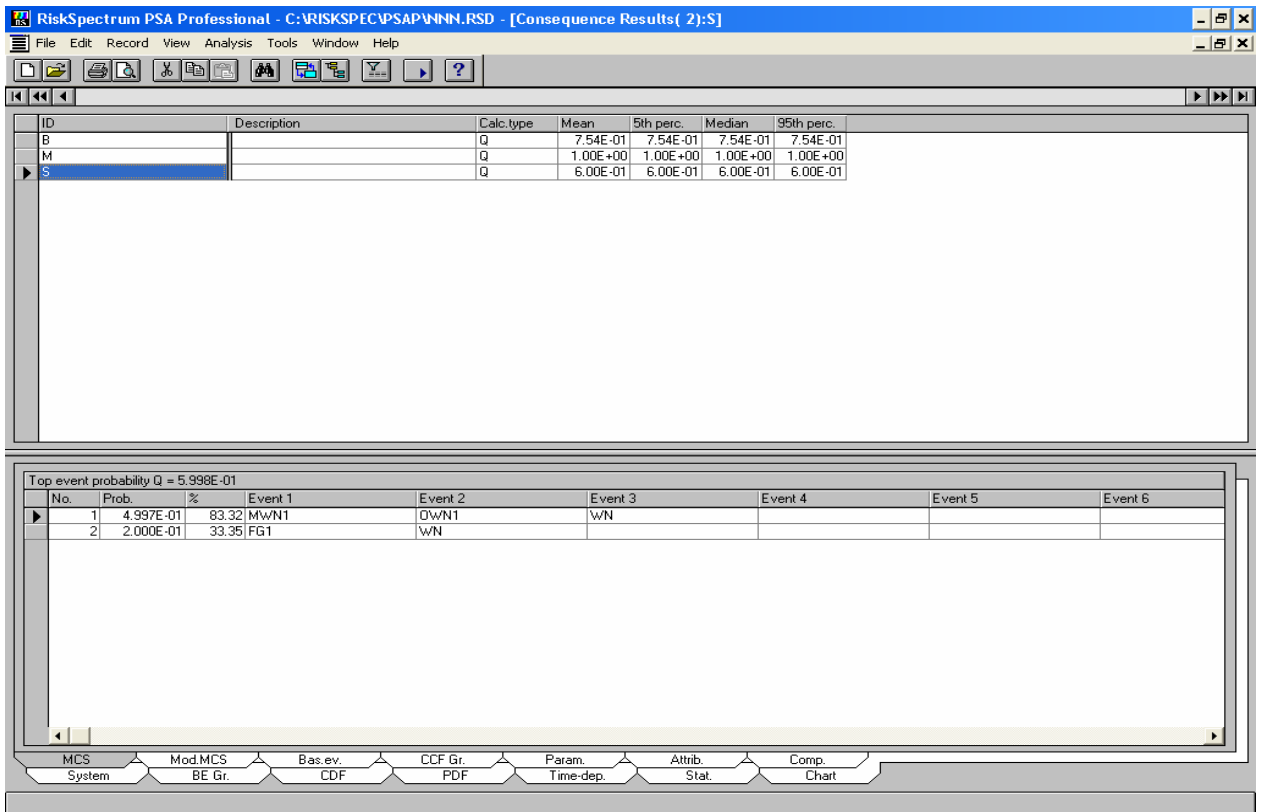


Рис. 2.11.10. Результаты расчетов вероятности реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба при обработке успеха по правилу «Log. and simple quant.» («Логическая и простая квантификация»)

На рис.2.11.11 и 2.11.12 представлены ДС и результаты расчетов реализации конечных состояний УППН при задании малых вероятностей неуспеха ($q_i=0.001$).

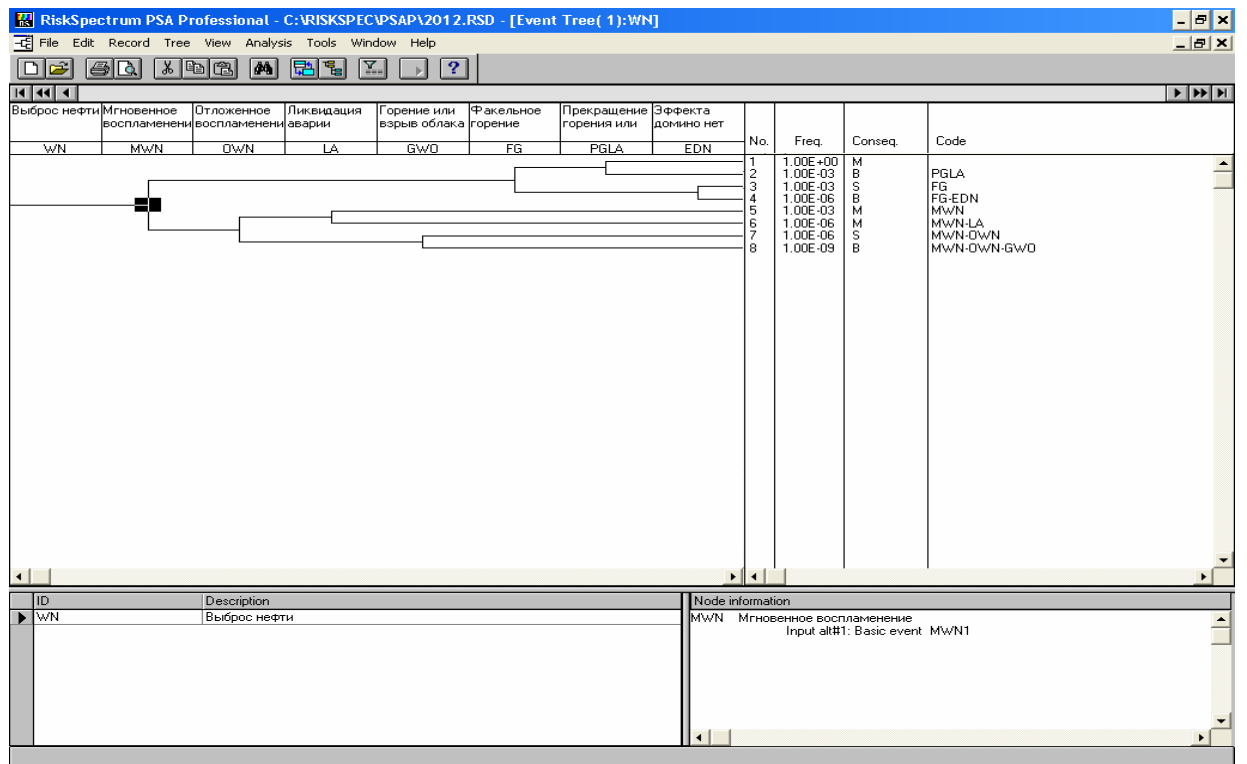


Рис. 2.11.11. Дерево событий для аварии на УППН при обработке успеха по правилу «Logical ET success» («Логический успех ДС») и малых вероятностях отказов

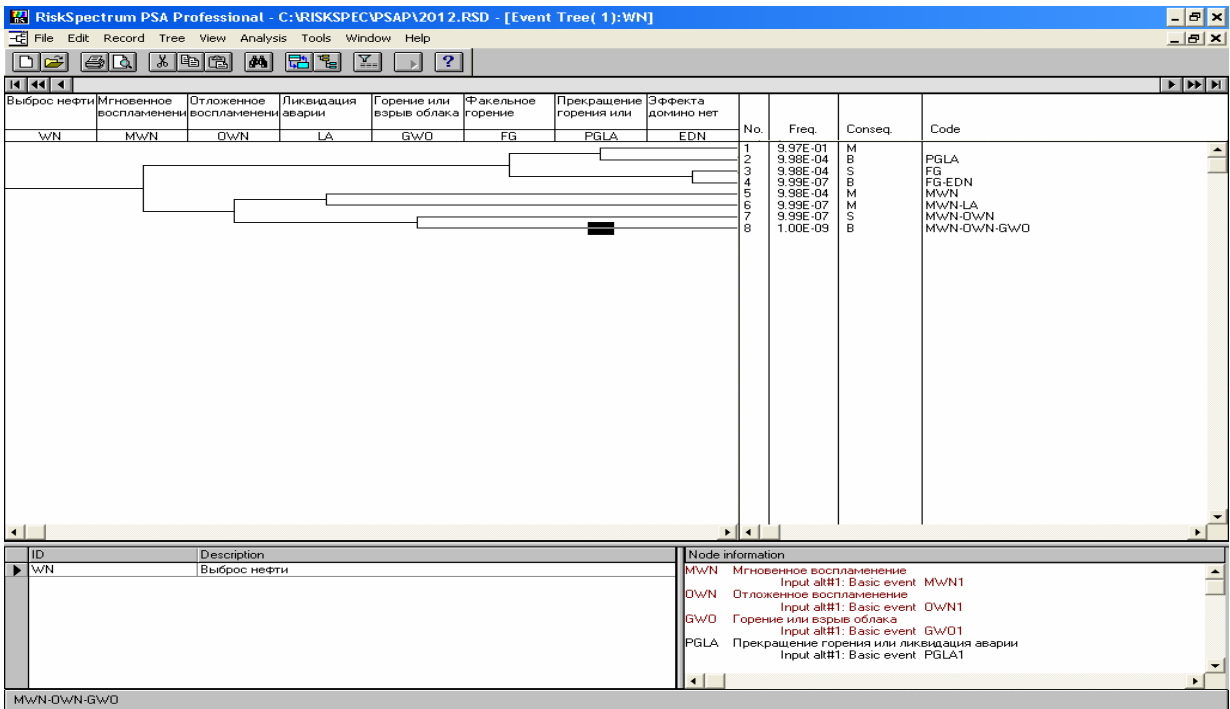


Рис. 2.11.12. Дерево событий для аварии на УППН при обработке успеха по правилу «Log. and simple quant.» («Логическая и простая квантификация») и малых вероятностях отказов

На рисунках 2.11.13 и 2.11.14 представлены результаты расчетов вероятности реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба при обработке успеха по различным правилам.

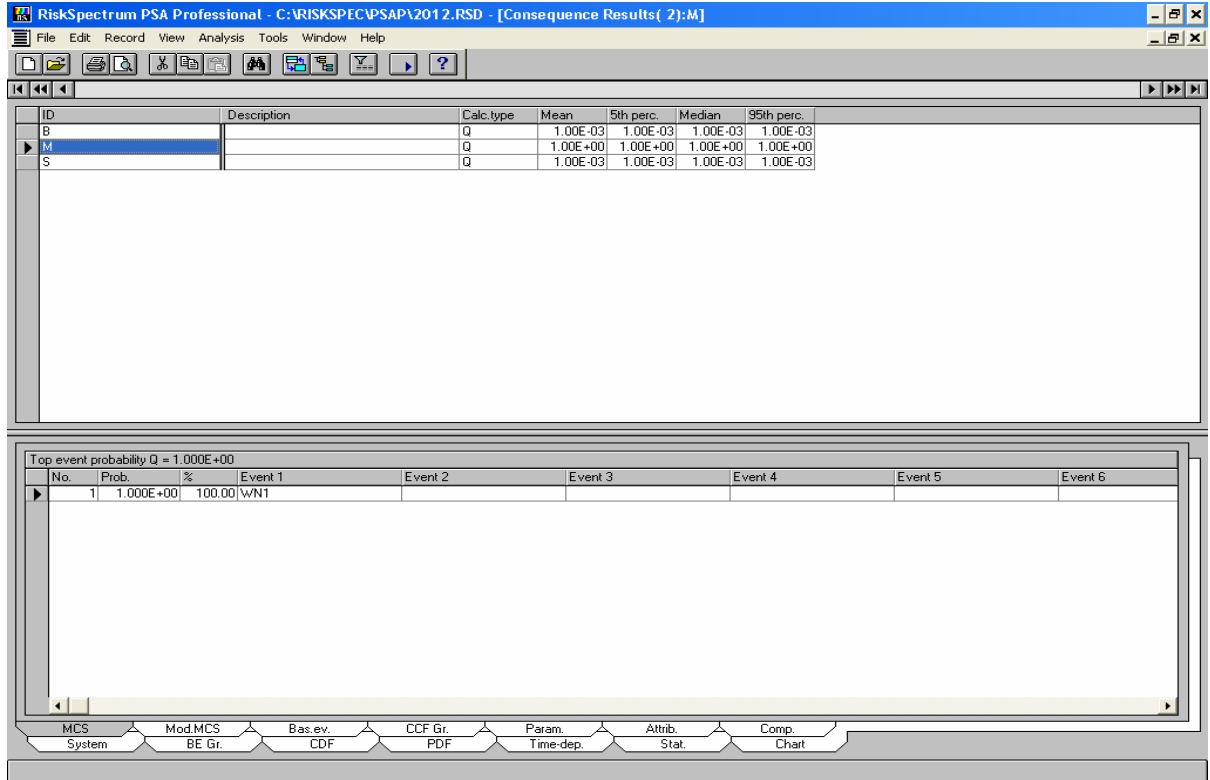


Рис. 2.11.13. Результаты расчетов вероятности реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба при обработке успеха по правилу «Logical ET success» («Логический успех ДС») и малых вероятностях отказа

ID - Char. #: 2	Description	Calc. type	Mean	5th perc.	Median	95th perc.	Text Result	Gate Out	BE Out	Exch. Out
B		Q	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	No	No	No	No
M		Q	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	No	No	No	No
S		Q	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	No	No	No	No

Setup Type	Setup ID	Run	Result
MCS Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Uncertainty Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Importance Analysis Specification	DEFAULT	Yes	Yes
Time-dep. Analysis Specification	DEFAULT	No	No

Рис. 2.11.14. Результаты расчетов вероятности реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба при обработке успеха по правилу «Log. and simple quant.» («Логическая и простая квантификация») и малых вероятностях отказов

Как следует из рис. 2.11.11 -2.11.14 в тех случаях, когда вероятности неуспеха малы, результаты расчета вероятностей реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба (результаты расчета последствий – в терминологии «Risk Spectrum») становятся близки к результатам, полученным с помощью других кодов и к результатам, полученным путем суммирования вероятностей реализации соответствующих конечных состояний, рассчитываемых кодом «Risk Spectrum». Соответствующие данные представлены в табл.2.11.2.

2.11.2.

Величина ущерба	Расчет по правилу «Logical ET success»	Расчеты по правилу «Log. and simple quant.»	Расчет с помощью кода «Risk Spectrum»	Результаты суммирования вероятностей КС
	Расчет с помощью кода «Risk Spectrum»	Результаты суммирования вероятностей КС		
Малая (M)	1.00E+0	$1.0 + 1.0E-3 + 1.0E-6 \approx 1.0$	1.00E+0	$0.997 + 9.98E-4 + 9.97E-7 \approx 0.997$
Средняя (S)	1.00E-3	$1.00E-3 + 1.00E-6 \approx 1.00E-3$	1.00E-3	$9.98E-4 + 9.97E-9 \approx 9.98E-4$
Большая (B)	1.00E-3	$1.00E-3 + 1.00E-6 + 1.00E-9 \approx 1.00E-3$	1.00E-3	$9.98E-4 + 9.99E-7 + 1.E-9 \approx 9.98E-4$

Сводная таблица результатов раздела 2.11. "Анализ различных сценариев аварий на установке первичной переработки нефти"					
Характеристики сценариев аварии		Результаты моделирования и расчетов			
		Relex Event Tree	ПК АСМ	Risk Spectrum	
1		2	3	4	
Варианты развития аварии	1	прекращение горения	0.02	0.02	0.02
	2	разрушение	0.02	0.02	0.02
	3	эффект домино	0.001	0.001	0.001
	4	разрушение	0.009	0.009	0.009
	5	ликвидация аварии	0.349998	0.35	0.35
	6	прекращение горения	0.099998	0.0999999999999999	0.1
	7	пожар пролива	0.100001	0.1	0.0999
	8	горение или взрыв	0.400003	0.4	0.4
Уровни последствий аварии	высокий (1000 уе.)		0.429003	0.429	0.001
	средний (250 уе.)		0.101001	0.101	0.001
	минимальный (100 уе.)		0.469996	0.47	0.1
Ожидаемый ущерб от аварии		не вычисляется	501.25 уе.	Не вычисляется	
Показатели вкладов элементов в ожидаемый ущерб от аварии		не вычисляется	$\beta_2^{+(W_c)} = +123.75 \text{ уе};$ $\beta_{22}^{+(W_c)} = -6.51 \text{ уе};$ $\beta_3^{+(W_c)} = -3.75 \text{ уе};$ $\beta_{33}^{+(W_c)} = +15.0 \text{ уе};$ $\beta_4^{+(W_c)} = -357.0 \text{ уе};$ $\beta_{44}^{+(W_c)} = +337.5 \text{ уе};$ $\beta_5^{+(W_c)} = -18.0 \text{ уе};$ $\beta_{55}^{+(W_c)} = +18.0 \text{ уе};$ $\beta_6^{+(W_c)} = -6.75 \text{ уе};$ $\beta_{66}^{+(W_c)} = +0.75 \text{ уе};$ $\beta_7^{+(W_c)} = 0.0 \text{ уе};$ $\beta_{77}^{+(W_c)} = 0.0 \text{ уе};$ $\beta_8^{+(W_c)} = -300.0 \text{ уе};$ $\beta_{88}^{+(W_c)} = +75.0 \text{ уе}.$	не вычисляется	

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.11

Выводы специалистов ИПУ РАН

Данный раздел опять посвящен составлению и решению классической логико-вероятностной модели. Все три комплекса успешно справились с этими задачами. Непонятные цифры в суммарных вероятностях уровней ущерба у ПК Risk Spectrum, по-видимому, не являются недостатками технологии на задачах данного класса. Это какая-то ошибка.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Настоящий пример подтверждает, что средствами СФЦ, технологии и ПК АСМ успешно решается третий типовой класс задач, использующий в качестве исходных структурных схем аппарат "деревьев событий".
2. Из сводной таблицы результатов данного раздела 2.11 видно:
 - Результаты расчетов вероятностей развития аварии, вычисленные методами и средствами технологии АСМ, полностью совпали с результатами, полученными модулем Relex Event Tree и ПК Risk Spectrum;
 - Результаты расчетов вероятностей различных уровней последствий аварии, вычисленные методами и средствами технологии АСМ, полностью совпали с результатами, полученными модулем Relex Event Tree и не совпали с результатами, полученными ПК Risk Spectrum;
 - Автоматизированное моделирование и расчет ожидаемого ущерба от аварии, значимостей и вкладов элементов по этому показателю выполнен с помощью ПК АСМ. Решения этой задачи другими технологиями и программными средствами не приведены;
3. Важное место в анализе риска опасных производственных объектов занимает количественная оценка роли отдельных и групп элементов (значимостей и вкладов) на значение ожидаемого ущерба. На их основе можно осуществлять обоснованную выработку и принятие решений по обеспечению безопасности и уменьшению риска функционирования разрабатываемых и эксплуатируемых опасных производственных объектов. В настоящее время эти методы автоматизированного моделирования и расчетов показателей риска используются для подготовки пояснительных записок к декларациям безопасности и планам локализации и ликвидации аварийных ситуаций на ряде опасных производственных объектов.
4. Результаты решения этого важного класса задач, полученные специалистами ОАО "СПИК СЗМА", позволяют начать разработку специализированных программных систем комплексного автоматизированного моделирования и оценки ожидаемого ущерба от возможных аварий на опасных производственных объектах. Главной особенностью таких комплексов является эффективное объединение методов и средств автоматизированного моделирования и расчета вероятностных характеристик сценариев развития аварий с методами и средствами автоматизированного моделирования и расчета возможных последствий аварий на опасных производственных объектах [26].

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Все три программных комплекса могут решать задачи данного класса. Однако следует отметить, что результаты, получаемые с помощью ПК Risk Spectrum, совпадают с решениями по другим кодам, только при обработке успеха по правилу «Log. and simple quant.» («Логическая и простая квантификация»).

2. Результаты расчета последствий для групп состояний с одинаковым уровнем ущерба с помощью кода Risk Spectrum не совпадают не только с результатами, полученными с помощью других кодов, но и с результатами, получаемыми путем суммирования вероятностей реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба. Причина этого несоответствия до конца не выяснена.

3. В тех случаях, когда вероятности неуспеха малы, результаты расчета вероятностей реализации состояний с одинаковым уровнем ущерба (результаты расчета последствий – в терминологии «Risk Spectrum») становятся близки к результатам, полученным с помощью других кодов и к результатам, полученным путем суммирования вероятностей реализации соответствующих конечных состояний, рассчитываемых кодом «Risk Spectrum».

4. Только программный комплекс АСМ позволяет рассчитывать величину риска, как показатель безопасности, равный произведению вероятности аварии на величину ущерба от этой аварии. Два других кода не позволяют получать таких решений.

2.12. Анализ безопасности автоматизированной заправочной станции

2.12.1. Описание задачи

Требуется выполнить вероятностный анализ безопасности объекта автоматизированной заправки емкости нефтепродуктами. Укрупненная схема данного объекта изображена на рис.2.12.1 [27].

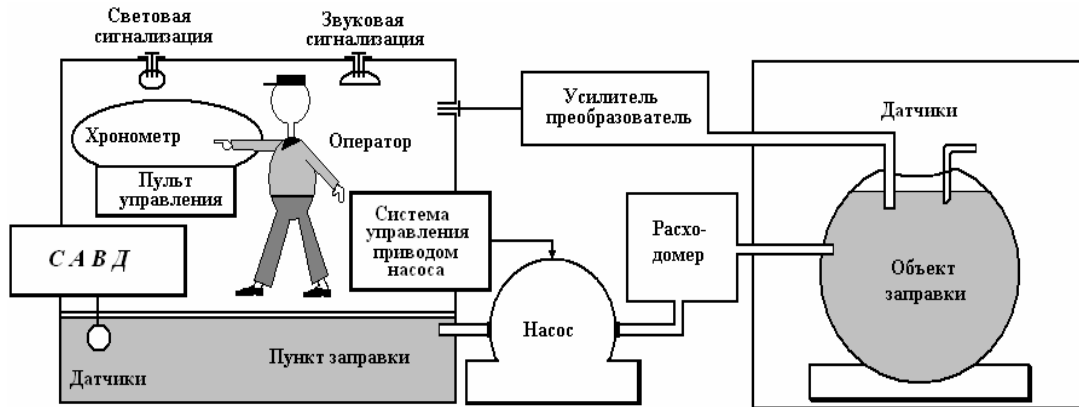


Рис.2.12.1. Объект автоматизированной заправки емкости нефтепродуктами

На основе детального анализа системы, изображенной на рис.2.12.1 (назначения и организации работы элементов автоматизированной заправки, подсистемы автоматической противоаварийной защиты, средств индикации, управления и действий оператора по предотвращению аварии), разработана функциональная блок-схема штатной (безопасной, безаварийной) работы объекта автоматизированной заправки нефтепродуктами, приведенная на рис.2.12.2.

В этой функциональной блок-схеме прямоугольниками 1, 2, 4-6, 11-13 обозначены события безотказной работы технических средств подсистем противоаварийной защиты и управления насосом. Кругами 7-10 на блок-схеме обозначены события, характеризующие штатные (безошибочные) действия оператора.



Рис.2.12.2. Функциональная блок-схема безопасности заправочной операции

Краткие описания и заданные вероятности указанных элементарных (исходных) событий приведены в таблице 2.12.1.

Таблица 2.12.1.

Исходные события модели безопасности заправочной операции

№ <i>i</i>	Описание события	Вероятность события p_i
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась включенной	0,9995
2	Не произошел обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы	0,99999
3	Не произошло ослабления сигнала выдачи дозы помехами	0,9999
4	Не отказал усилитель-преобразователь сигнала выдачи дозы	0,9998
5	Не отказал расходомер	0,9997
6	Не отказал датчик уровня	0,9998
7	Оператор заметил световую индикацию о неисправности САВД	0,995
8	Оператор услышал звуковую сигнализацию об отказе САВД	0,999
9	Оператор знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени	0,999
10	Оператор заметил индикацию хронометра об истечении заданного времени заправки	0,996
11	Хронометр не отказал	0,99999
12	Не отказал автоматический выключатель электропривода насоса	0,99999
13	Не произошел обрыв в цепи управления приводом насоса	0,99999

2.12.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Тестовый расчет проведен в модулях Relex Деревьев Отказов (Relex Fault Tree) и Блок-Схем Надежности.

Дерево отказов представлено на рис. 2.12.3.

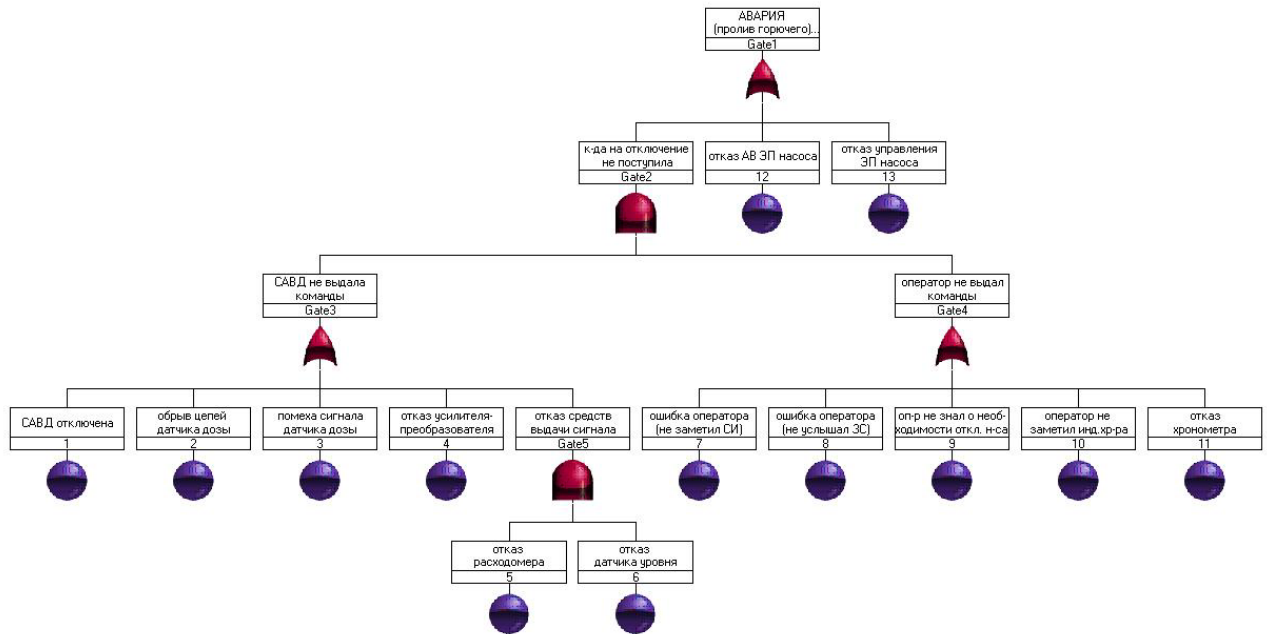


Рис. 2.12.3 Дерево отказов для аварии на заправочной станции

Список базисных событий дерева и значений соответствующих вероятностей приведен в таблице 2.12.2.

Таблица 2.12.2.

Исходные события дерева отказов заправочной станции

№ <i>i</i>	Описание события	Вероятность события p_i
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)	0,0005
2	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы	0,00001
3	Ослабления сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее воздействие)	0,0001
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера	0,0003
6	Отказ датчика уровня	0,0002
7	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД (ошибка оператора)	0,005
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД (ошибка оператора)	0,001
9	Оператор не знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени	0,001
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени заправки	0,004
11	Отказ хронометра	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насоса	0,00001
13	Обрыв цепей управления приводом насоса	0,00001

В результате расчета на дереве отказов, построенном в модуле Relex Fault Tree, получено значение вероятности возникновения аварии заправочной станции

$$P\{\text{аварии}\} = 0.00002888.$$

Пример 12 был решен в постановке задачи, данной в методических материалах Госгортехнадзора. Однако, по нашему мнению, такая постановка является упрощенной и не содержит специфичных, именно для анализа безопасности, особенностей. Кроме того, хотелось бы отметить, что для данной постановки задачи не совсем обоснованным является привлечение аппарата деревьев отказов, так как решение может быть получено гораздо более простыми способами. В частности, можно использовать блок-схемы надежности последовательно-параллельных систем. Блок-схема для решения задачи анализа безопасности заправочной станции, набранная в модуле Relx RBD, представлена рис. 2.12.8.

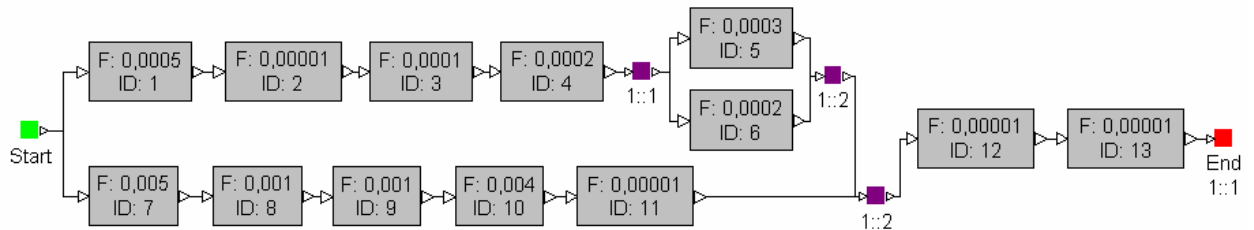


Рис. 2.11.4. Блок-схема безопасности автоматизированной заправочной станции

В результате расчета получено значение вероятности возникновения аварии

$$P\{\text{аварии}\} = 0.0000288849.$$

Другим, еще более простым способом, является решение по формуле:

$$P\{\text{отсутствия аварии}\} = (1 - (1 - P_1 * P_2 * P_3 * P_4 * (P_5 + Q_5 * P_6)) * (1 - P_7 * P_8 * P_9 * P_{10} * P_{11})) * P_{12} * P_{13},$$

где P_i взяты из таблицы 2.12.1.

Формульное выражение позволяет получить еще более точный результат для вероятности отсутствия аварии на заправочной станции, равный

$$P\{\text{отсутствия аварии}\} = 0.999971115111788$$

2.12.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

Указанных в п. 2.12.1 данных достаточно, чтобы приступить к разработке СФЦ, необходимой для автоматизированного вероятностного анализа безопасности рассматриваемой заправочной операции.

СФЦ могут быть двух видов. На основе прямой логики рассуждений может быть построена СФЦ, представляющая условия безопасного выполнения заправочной операции. На основе обратной логики рассуждений может быть построена СФЦ противоположной структурной модели возникновения аварии в процессе выполнения заправочной операции. Оба указанных вида структурных моделей эквивалентны, т.е. каждая из них дает одинаковые результаты ВАБ. Разница заключается только в простоте, удобстве и точности построения СФЦ того или иного вида. Право выбора вида разрабатываемой СФЦ в технологии АСМ предоставляется пользователю. В данном тестовом примере рассмотрим оба варианта.

Пример 1. Решение задачи ВАБ заправочной станции на основе СФЦ безопасности

В данном случае для построения СФЦ применяется прямая логика рассуждений. На основе знаний объекта исследования (см. рис.2.12.1), функциональной блок-схемы безопасности заправочной операции (см. рис.2.12.2) и состава ее элементов (см. таблицу 2.12.1) определяются логические условия штатного (правильного, безаварийного) функционирования исследуемой системы. Безопасностью (отсутствием события аварии) в данном случае является не пролив горючего, т.е. не переполнение емкости из-за излишней продолжительности работы насоса вследствие его не отключения вовремя (сразу после окончания заполнения емкости). В рассматриваемой задаче таких основных условий может быть выделено всего три.

1. Команда на выключение насоса может быть выдана автоматически от САВД на основе обработки сигналов от датчиков;
2. Команда на выключение насоса может быть выдана вручную оператором на основе анализа показателей индикаторов процесса заправки;
3. После автоматической или ручной выдачи указанной команды должна безотказно выполнить свои функции подсистема выключения насоса.

На рис. 2.12.5. изображены фрагменты СФЦ, представляющие реализованную в данной системе логику совместной работы элементов и действий оператора, обеспечивающих реализацию указанных трех условий безопасного выполнения заправочной операции.

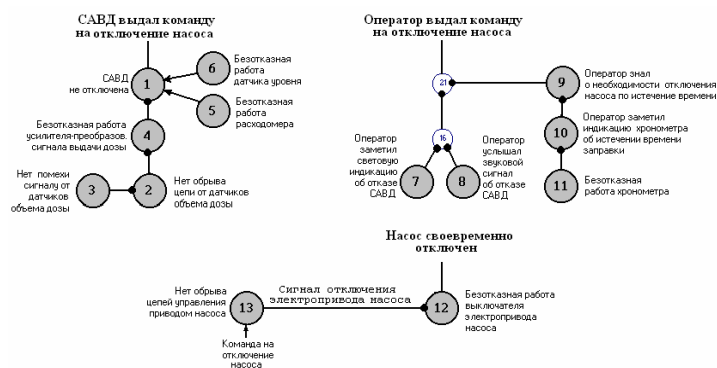


Рис.2.12.5. Фрагменты СФЦ реализации основных условий безопасности заправочной операции

Объединяя разработанные фрагменты, получаем СФЦ безопасности заправочной операции. Она изображена на рис.2.12.6.а.

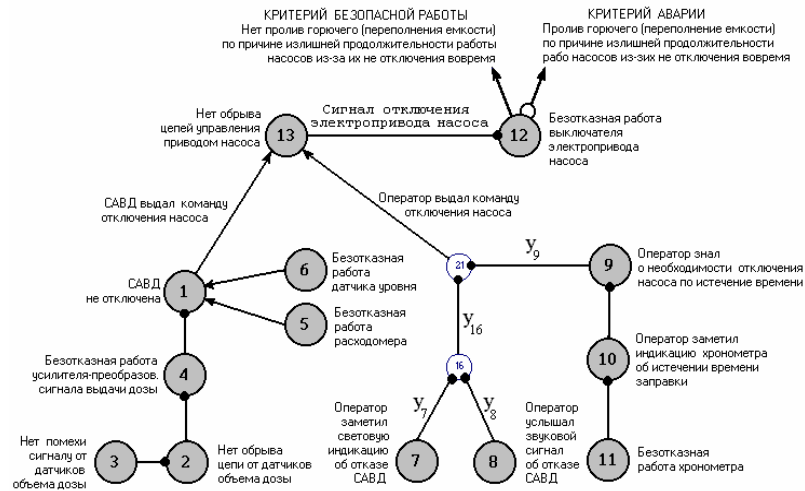


Рис.2.12.6.а. СФЦ безопасности заправочной операции

Как видим данная СФЦ является прямым подобием исходной блок-схемы исследуемой системы (см.рис.2.12.2), поэтому ее построение не вызывает затруднений.

Выполняя на основе данной СФЦ и критерия безопасности $Y_{\text{безопасности}} = y_{12}$ автоматизированное моделирование и расчет с помощью ПК АСМ получаем:

$$Y_{\text{безопасности}} = y_{12} = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_{12} \cdot x_{13} \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_{12} \cdot x_{13} \vee x_7 \cdot x_8 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_{12} \cdot x_{13}$$

$$P_{\text{безопасности}} = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 q_6 p_{12} p_{13} + p_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_1 p_2 p_3 p_4 p_6 p_{12} p_{13} - p_1 p_2 p_3 p_4 p_6 p_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} - p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 q_6 p_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} = 0.99997111 5112$$

Логическая модель точно совпала с КПУФ данной системы, приведенными в РД 03-418-01, а расчет вероятности безопасности практически совпал с результатом решения этой задачи, полученным с помощью модуля Relex RBD.

На основе той же СФЦ, изображенной на рис.2.12.6.а, задавая критерий аварии $Y_{\text{аварии}} = \bar{y}_{12}$ получаем с помощью ПК АСМ точные противоположные логические и вероятностные модели данной системы.

$$Y_{\text{аварии}} = y''_{12} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_7 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_7 \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_7 \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_7 \vee \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_7 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_8 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_8 \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_8 \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_8 \vee \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_8 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_9 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_9 \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_9 \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_9 \vee \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_9 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{13}$$

$$P_{\text{аварии}} = q_3 q_{11} p_{12} p_{13} + q_2 p_3 q_{11} p_{12} p_{13} + p_2 p_3 q_4 q_{11} p_{12} p_{13} + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 q_6 q_{11} p_{12} p_{13} + q_1 p_2 p_3 p_4 q_{11} p_{12} p_{13} + q_3 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_2 p_3 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_2 p_3 q_4 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 q_6 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_1 p_2 p_3 p_4 q_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_3 q_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_2 p_3 q_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_2 p_3 q_4 q_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 q_6 q_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_1 p_2 p_3 p_4 q_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_3 q_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_2 p_3 q_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_2 p_3 q_4 q_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 q_6 q_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_1 p_2 p_3 p_4 q_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_3 q_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_2 p_3 q_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_2 p_3 q_4 q_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 q_6 q_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_1 p_2 p_3 p_4 q_7 p_8 p_9 p_{10} p_{11} p_{12} p_{13} + q_1 p_{13} + q_2 p_{13} = 0.000028884888$$

Пример 2. Решение задачи ВАБ на основе СФЦ дерева отказа заправочной станции

Теперь выполним ВАБ рассматриваемой заправочной операции, используя для построения исходной структурной модели не прямую, а обратную логику рассуждений. Именно такой подход применяется в технологиях и программных комплексах, в которых в качестве исходной структурной схемы системы используются деревья отказов.

Для построения СФЦ аварии (дерева отказа) необходимо на основе знаний объекта исследования, его функциональной блок-схемы безопасности и состава элементов определить не условия штатного (безаварийного, безопасного) выполнения заправочной операции (что было выполнено в предыдущем решении), а все возможные условия нарушения этого штатного функционирования, приводящие к возникновению аварии. Теперь для постановки задачи ВАБ надо определить и графически отобразить в СФЦ аварии (дерева отказа) все комбинации отказов элементов, приводящие к проливу горючего, т.е. переполнению емкости из-за излишней продолжительности работы насоса вследствие его не отключения вовремя. Не трудно видеть, что для выделения указанных условий возникновения аварии и последующего их представления с помощью СФЦ, все равно, сначала необходимо определить условия штатного, безаварийного функционирования исследуемой системы, поскольку только на основе этих знаний можно правильно определить условия возникновения аварии.

Проиллюстрируем сказанное. Ранее мы выделили три условия штатного, безаварийного выполнения заправочной операции. На рис.2.12.5 они представлены соответствующими тремя фрагментами СФЦ. Естественно, что в структурной модели аварии необходимо отобразить все возможные варианты нарушения (не выполнения) каждого из указанных штатных условий безаварийной работы системы.

Варианты таких фрагментов СФЦ приведены в правой части рис.2.12.6.б. Для удобства сравнения и контроля их правильности, в левой части рис.2.12.6.б повторены фрагменты ранее разработанных СФЦ реализации условий безопасности заправочной операции.

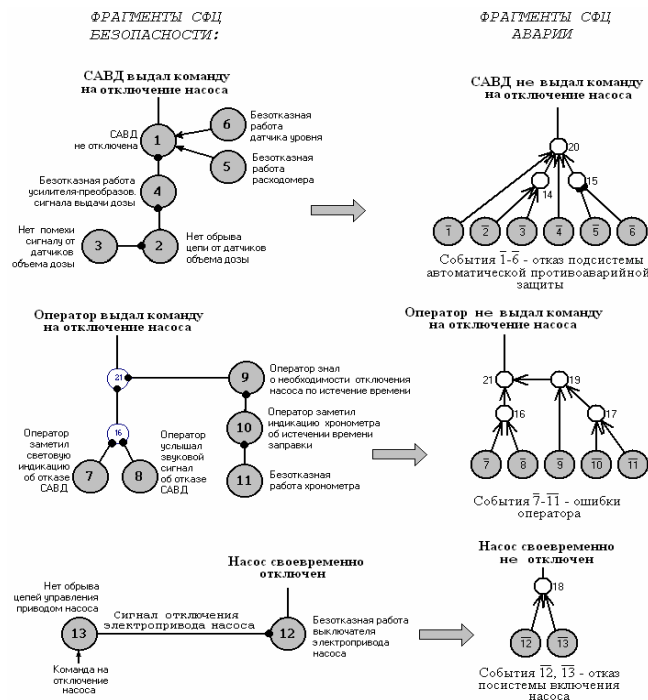


Рис.2.12.6.б. Разработка фрагментов СФЦ нарушения условий безопасного выполнения заправочной операции

Все элементарные события в СФЦ правой части рис.2.12.6.б представлены противоположными исходами (отказами, ошибками), по отношению к событиям, которые использовались ранее, при построении СФЦ безопасности. На рис.2.12.6.б номера противоположных элементарных событий помечены знаками инверсирования.

Объединяя фрагменты правой части рис.2.12.6.б. получаем СФЦ аварии (дерево отказа) рассматриваемой заправочной операции. Она изображена на рис.2.12.7.

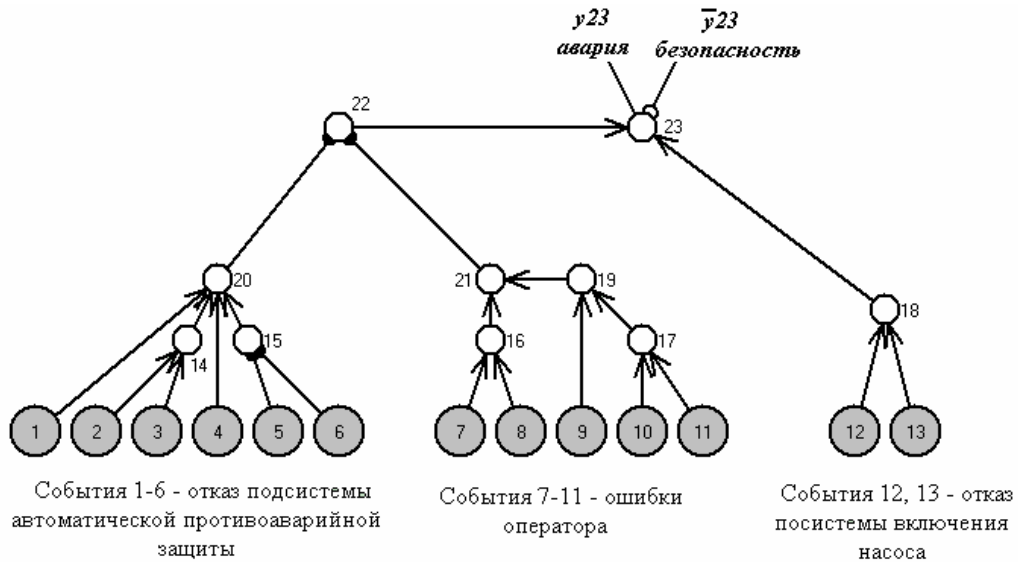


Рис.2.12.7. СФЦ аварии заправочной операции

Все исходные события $i = 1, 2, \dots, 13$ в этой СФЦ противоположны событиям модели безопасности, а их вероятности являются дополнениями соответствующих параметров, указанных в таблице 2.12.1. Выполняя моделирование аварии этой системы на ПК АСМ по критерию $Y_{аварии} = y_{23}$, получаем:

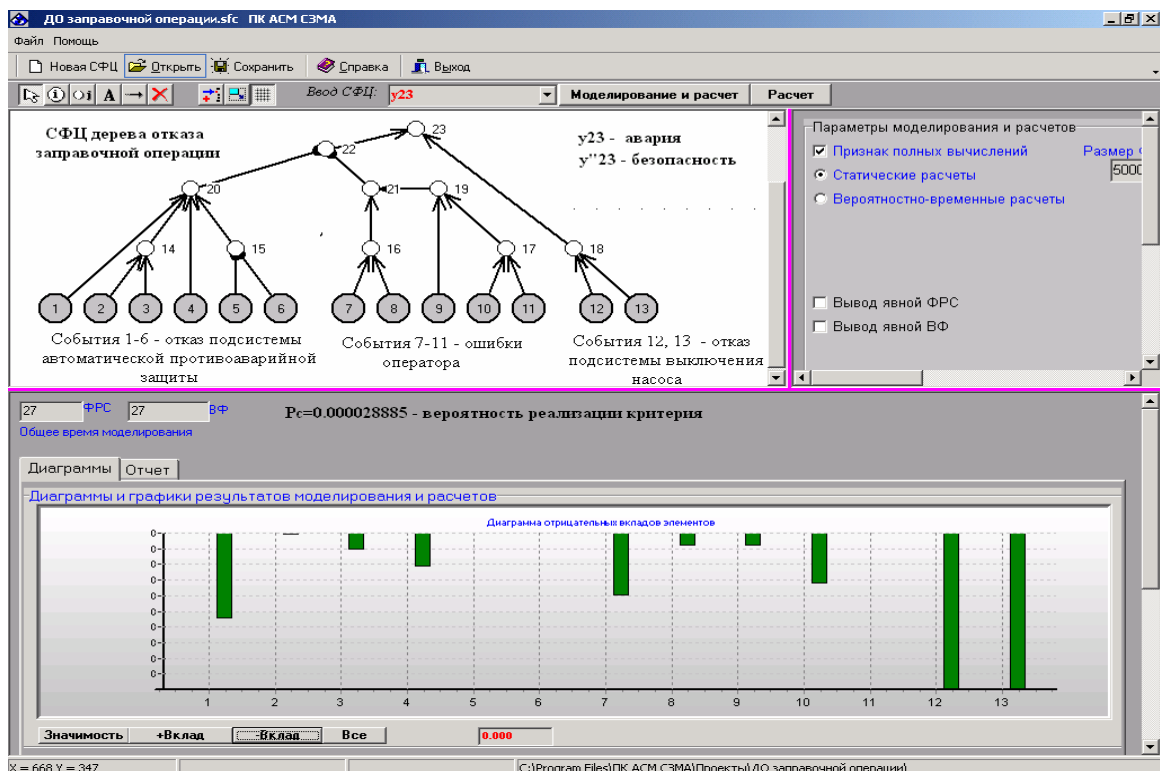


Рис.2.12.8. Моделирование и расчет аварии заправочной операции на ПК АСМ СЗМА

Логическая модель аварии:

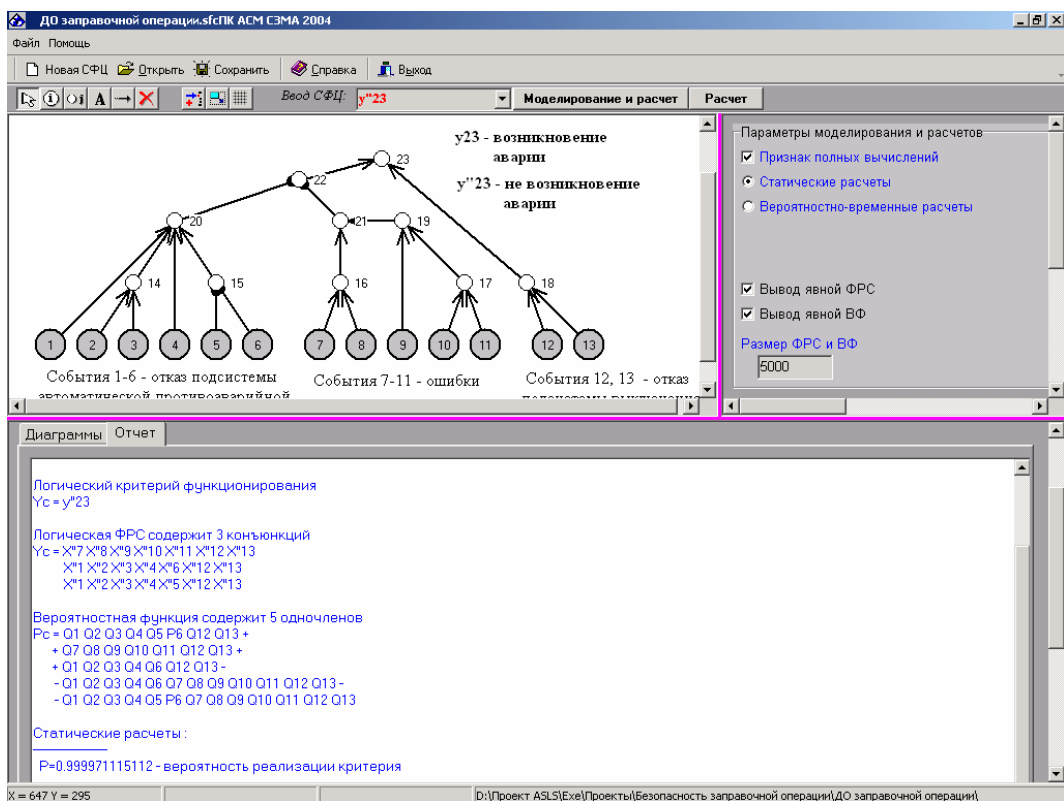
$$Y_{\text{аварии}} = y_{23} = x_1 \cdot x_7 \vee x_2 \cdot x_7 \vee x_3 \cdot x_7 \vee x_4 \cdot x_7 \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_7 \vee x_1 \cdot x_8 \vee x_2 \cdot x_8 \vee x_3 \cdot x_8 \vee x_4 \cdot x_8 \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_8 \vee x_1 \cdot x_9 \vee x_2 \cdot x_9 \vee x_3 \cdot x_9 \vee x_4 \cdot x_9 \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \vee x_1 \cdot x_{10} \vee x_2 \cdot x_{10} \vee x_3 \cdot x_{10} \vee x_4 \cdot x_{10} \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_{10} \vee x_1 \cdot x_{11} \vee x_2 \cdot x_{11} \vee x_3 \cdot x_{11} \vee x_4 \cdot x_{11} \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13}$$

Вероятностная модель аварии:

$$P_{\text{аварии}} = p_1 p_7 q_{12} q_{13} + q_1 p_2 p_7 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 p_3 p_7 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 p_4 p_7 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 q_4 p_5 p_6 p_7 q_{12} q_{13} + p_1 q_7 p_8 q_{12} q_{13} + q_1 p_2 q_7 p_8 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 p_3 q_7 p_8 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 p_4 q_7 p_8 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 q_4 p_5 p_6 q_7 p_8 q_{12} q_{13} + p_1 q_7 q_8 p_9 q_{12} q_{13} + q_1 p_2 q_7 q_8 p_9 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 p_3 q_7 q_8 p_9 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 p_4 q_7 q_8 p_9 q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 q_4 p_5 p_6 q_7 q_8 p_9 q_{12} q_{13} + p_1 q_7 q_8 q_9 p_{10} q_{12} q_{13} + q_1 p_2 q_7 q_8 q_9 p_{10} q_{12} q_{13} + q_1 q_2 p_3 q_7 q_8 q_9 p_{10} q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 p_4 q_7 q_8 q_9 p_{10} q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 q_4 p_5 p_6 q_7 q_8 q_9 p_{10} q_{12} q_{13} + p_1 q_7 q_8 q_9 q_{10} p_{11} q_{12} q_{13} + q_1 p_2 q_7 q_8 q_9 q_{10} p_{11} q_{12} q_{13} + q_1 q_2 p_3 q_7 q_8 q_9 q_{10} p_{11} q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 p_4 q_7 q_8 q_9 q_{10} p_{11} q_{12} q_{13} + q_1 q_2 q_3 q_4 p_5 p_6 q_7 q_8 q_9 q_{10} p_{11} q_{12} q_{13} + p_{12} + q_{12} p_{13} = 0.000028884888$$

Логическая модель точно совпала с МСО данной системы, приведенными в РД 03-418-01, а расчет вероятности безопасности практически совпал с результатом решения этой задачи, полученным с помощью модуля Relex Fault Tree.

На основе той же СФЦ, изображенной на рис.2.12.7, задавая критерий $Y_{\text{безопасности}} = \overline{y}_{23}$ получаем с помощью ПК АСМ точные противоположные логические и вероятностные модели безопасности данной системы.



2.12.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

Дерево отказов АЗС, построенное в редакторе деревьев отказов ПК «Risk Spectrum», представлено на рисунке 2.12.9. Оно совершенно аналогично (с учетом другой системы используемых графических элементов) СФЦ, представленной на 2.12.7 и 2.12.8.

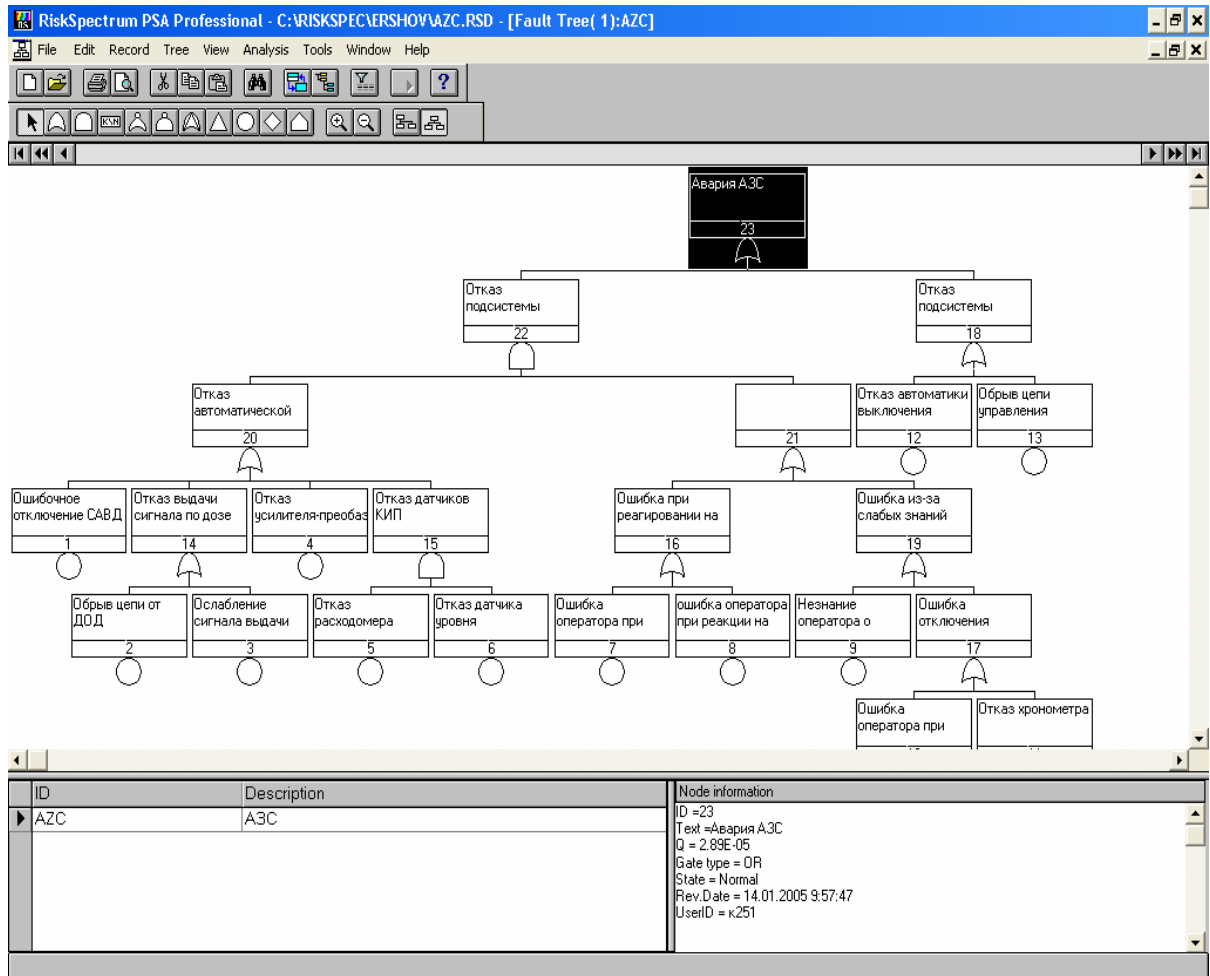


Рис. 2.12.9. Дерево отказов АЗС

Результаты расчетов представлены на рис. 2.12.10, а перечень минимальных сечений – на рис. 2.12.11. Расчеты проведены при использовании третьего уровня аппроксимации.

Как следует из данных рисунков, результаты моделирования и расчета полностью совпали с результатами расчетов по другим ПК.

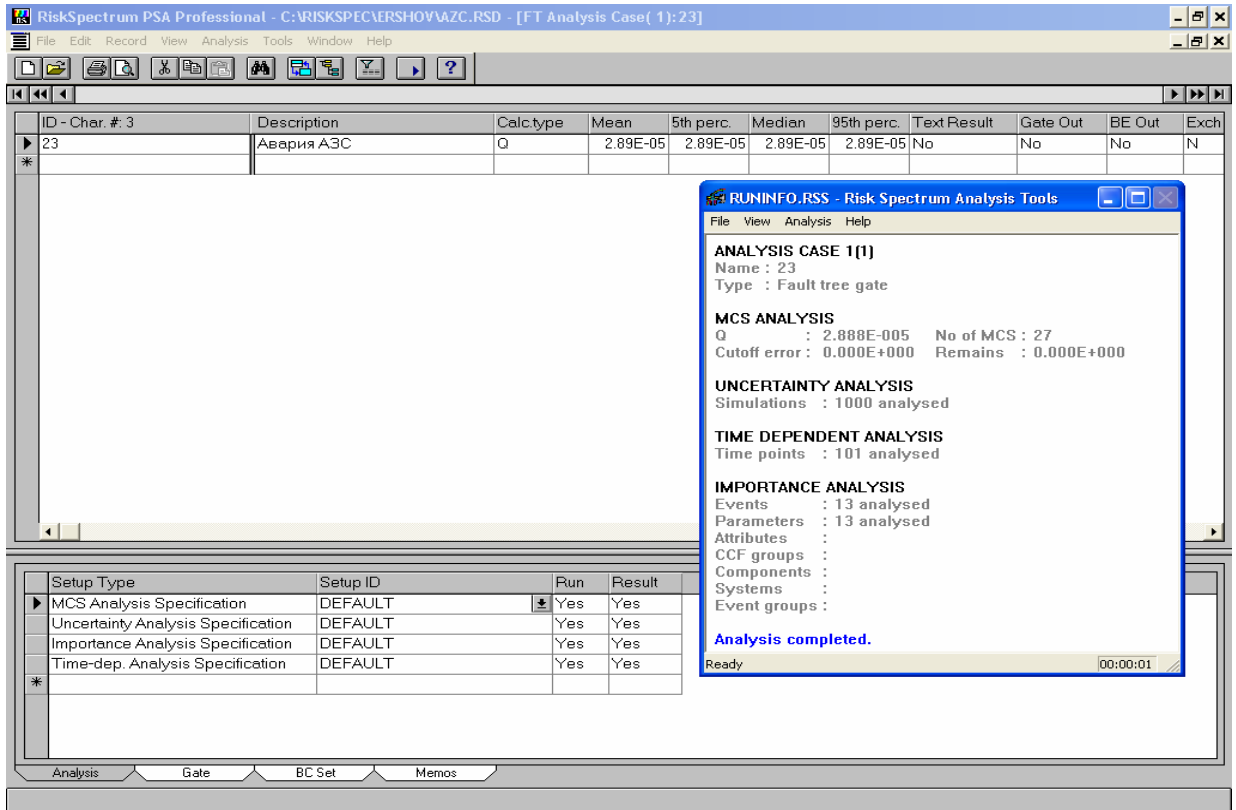


Рис. 2.12.10. Результаты расчетов вероятности аварии заправочной операции на ПК «Risk Spectrum»

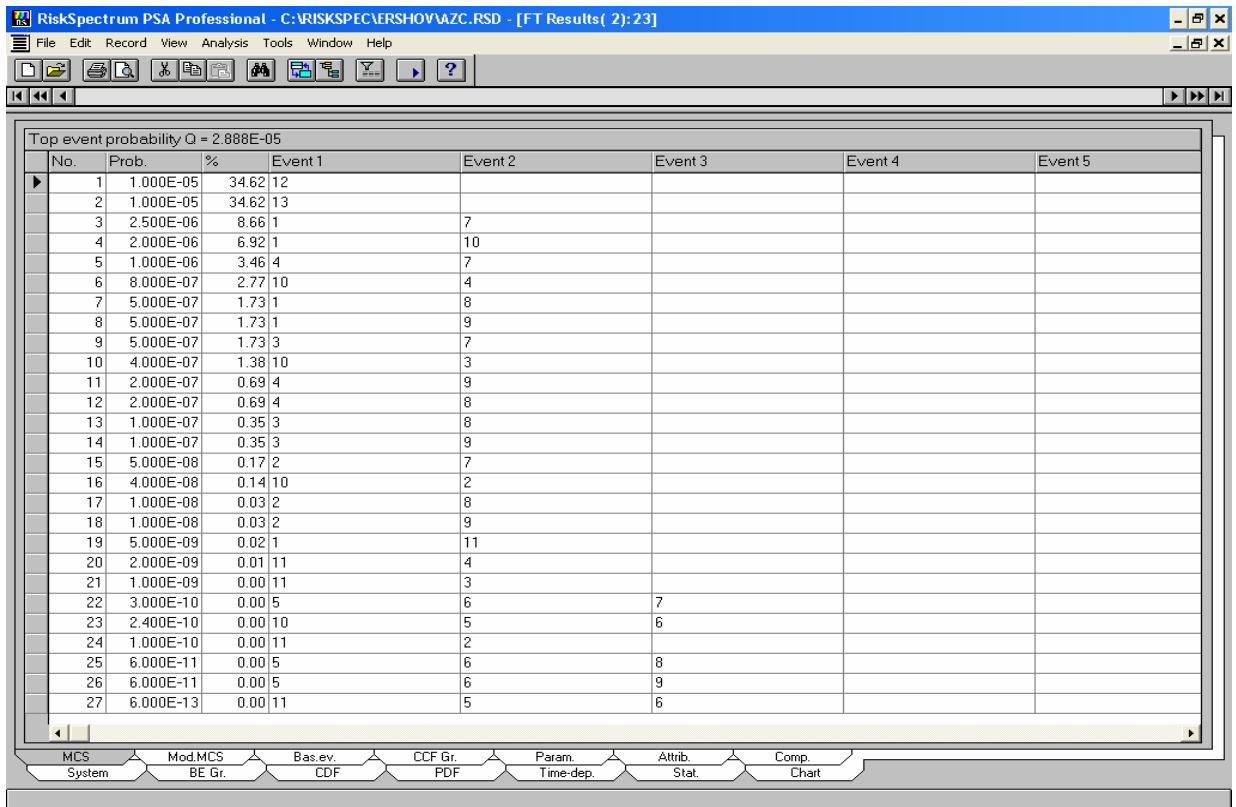


Рис. 2.12.11. Минимальные сечения отказов при аварии заправочной операции, полученные на ПК «Risk Spectrum»

Сводная таблица результатов раздела 2.12. " Анализ безопасности автоматизированной заправочной станции "			
Показатели безопасности АЗС	Результаты моделирования и расчетов		
	Relex Markov	ПК АСМ	Risk Spectrum
1	2	3	4
Число конъюнкций логической модель возникновения аварии	<i>Логические модели совпали</i>		
	27	27	27
Вероятность возникновения аварии	Relex Fault Tree	0.000028884888	2.89E-5 = = 0.0000289
	0.00002888		
	Relex RBD		
	0.0000288849		
Число конъюнкций логической модель отсутствия аварии			
		3	не определяются
Вероятность отсутствия аварии	0.99997112	0.999971115112	

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.12

Выводы специалистов ИПУ РАН

С классической логико-вероятностной задачей данного раздела все три комплекса успешно справились.

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Средствами технологий АСМ и Relex данная задача двумя способами, на основе блок-схемы и дерева отказов. Средствами Risk Spectrum разработана обратная модель возникновения аварии с помощью дерева отказов.
2. Все результаты моделирования и расчетов совпали.

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Результаты решения данной задачи всеми тремя комплексами одинаковы.
2. ПК Relex позволяет решить данную задачу, как на основе деревьев отказов, так и на основе блок-схем, генерировать как КПУФ, так и МСО.
3. ПК АСМ позволяет решать как прямую, так и обратную задачу по СФЦ «успеха» и по СФЦ «отказа», генерировать как КПУФ, так и МСО.
4. ПК Risk Spectrum позволяет решать только один вид задач по одной графической модели, генерировать только списки МСО.

ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. Заключение специалистов ИПУ РАН

Отметим основные особенности трех программных комплексов анализа надежности и безопасности систем.

Программные комплексы компании "СПИК СЗМА" и "RISK SPECTRUM" компании "RELKON" реализуют один класс "надежностных" моделей оценки показателей систем – класс логико-вероятностного моделирования (под "надежностными" моделями подразумеваются как модели классической надежности, так и модели безопасности и технической эффективности, в частности, производительности, пропускной способности, риска). Этот класс моделей можно назвать классом статических моделей, так как они позволяют вычислять показатели надежности, безопасности и эффективности систем в момент времени t , в зависимости от возможных наборов работоспособных и неработоспособных состояний элементов системы в данный момент времени. Причем процессы функционирования, отказов, восстановления любого элемента системы не зависят от других элементов, поэтому не требуется анализ происходящих событий на интервале функционирования. Такими показателями являются:

- коэффициент готовности (простоя; стационарный, нестационарный) или, в общем случае, вероятность заставить систему в момент времени t в выделенном классе состояний системы;
- параметр потока отказов (стационарный, нестационарный);
- средняя эффективность в момент времени t .

Для систем, в которых восстановление элементов не предусмотрено, нестационарный коэффициент готовности совпадает с вероятностью безотказной работы (ВБР) на интервале $(0, t)$, поэтому логико-вероятностные модели позволяют в этом случае вычислять ВБР. Для систем с восстанавливаемыми элементами возможно приближенное оценивание ВБР применением, напр., асимптотических результатов теории регенерирующих процессов. Но такая возможность имеется лишь в случае всех восстанавливаемых элементов и экспоненциальных распределений случайных величин, причем $\mu_i \gg \lambda_i$ (где μ_i , λ_i – интенсивности восстановления, отказа элемента i). Поэтому, напр., в примерах 3 (разделы 2.1.2-2.1.3), 2 (разделы 2.3.2-2.3.3), 2 (разделы 2.4.2-2.4.3) вычисленные оценки ВБР совпали. В случае смешанных систем (с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами) или систем с неэкспоненциальными распределениями исходных данных (времен до отказа и восстановления) для элементов, когда среднее время восстановления не является величиной много меньшей средней наработки до отказа, получить оценку ВБР логико-вероятностными методами едва ли возможно. Может потребоваться решение дифференциальных или интегральных уравнений, или хотя бы реализация интегрирования функций от параметра потока отказов. Поэтому примеры 4 (раздел 2.1.2), и 4,6 (раздел 2.4.2) в части оценки ВБР решены лишь ПК "RELEX". Аналогично обстоит дело и со средними наработками (средними временами). Лишь для случаев всех восстанавливаемых элементов с экспоненциальными распределениями времени до отказа и времени восстановления каждого элемента и для систем с невосстанавливаемыми элементами и экспоненциальным распределением времени до отказа элементов, могут быть получены оценки средних времен логико-вероятностными методами без интегрирования различных выражений (см. п.п. 1.2.4.1.2 и 1.2.4.2.3). В общем случае потребуются реализация более сложных процедур расчета и оценки, которые и реализованы в ПК "RELEX".

В ПК "RELEX" реализованы как статические модели "надежностного" анализа систем (логико-вероятностное моделирование с логическими функциями И, ИЛИ, НЕ, К/Н как в

RELEX RBD, так и в RELEX Fault Tree), так и динамические модели во всех аналитических модулях (RELEX RBD, RELEX PBD, RELEX Fault Tree, RELEX MARKOV).

Программные комплексы компании "СПИК СЗМА" имеют исключительно удобный и наглядный аппарат задания моделей (СФЦ), объединяющий лучшие стороны технологий блок-схем надежности, графов связи, деревьев отказов, деревьев событий. Классическое логико-вероятностное моделирование дополнено учетом групп несовместных событий и процедурами оценки ВБР (для оговоренных выше случаев). Эти факторы (учет групп несовместных событий и возможности оценки ВБР) значительно расширяют область применения комплекса (по сравнению с классическим логико-вероятностным моделированием), особенно с точки зрения анализа опасностей (безопасности). В настоящее время проходит развитие программных комплексов компании "СПИК СЗМА" как раз для учета ряда динамических факторов (напр., последовательности возникновения отказов). Поэтому достаточно «мощное» и высококачественное логико-вероятностное моделирование дополняется методами марковского моделирования, другими методами оценки показателей надежности, безопасности.

Динамические модели позволяют принципиально учитывать любые факторы, зависимости и вычислять любые показатели. Другое дело, какие именно факторы учитываются при разработке программного продукта и какие методы оценки показателей реализовываются (в частности, в ПК "RELEX"). Практически все примеры в разделах 2.1.2, 2.2.2, 2.3.2, 2.4.2, 2.6.2, 2.8.2, 2.9.2, 2.10.2 демонстрируют, какие из особенностей систем реализованы с применением динамических моделей в ПК "RELEX". Перечислим как продемонстрированные в примерах основные особенности, зависимости систем, так и не вошедшие в примеры:

- учет произвольных распределений наработок до отказа и времени восстановления элементов;
- ненагруженное, облегченное, скользящее резервирование;
- фазы (этапы) работы элементов, блоков и системы в целом;
- учет несовместности отказов и последовательности их возникновения;
- учет временных задержек в срабатывании логических вершин (напр., некоторые виды временной избыточности);
- учет общих причин отказов не только в предлагаемых моделях (α , β факторные модели и т.п.), но и разработка собственных моделей на марковских процессах, с включением их в как в деревья, так и в блок-схемы;
- учет ограничений на число бригад по восстановлению и на ЗИП;
- учет возможности восстановления системы после её отказа и/или останова (когда в процессе функционирования восстановление недопустимо);
- реализация некоторых моделей контроля работоспособности (а не только модель с мгновенным проявлением и обнаружением отказа);
- учет технического обслуживания с возможностью восстановления не только работоспособности, но и ресурса (для элементов со "стареющими" распределениями).

По мнению представителей ИПУ РАН при анализе и оценке показателей безопасности (опасности) недопустимо применение моделей, не учитывающих несовместные виды отказов элементов и системы в целом, последовательности возникновения отказов и методов, не позволяющих относительно аварийных состояний с различными последствиями, получать интервальные показатели типа вероятности возникновения

аварии вида i на интервале функционирования для систем с восстановлением элементов. Именно эти особенности и выделяют класс вероятностных моделей безопасности из всех моделей “надежностного” анализа.

В ПК “RISK SPECTRUM” реализовано классическое логико-вероятностное моделирование (да ещё и приближенное, и основывающееся на представлении моделей только в виде деревьев). Решать на нём серьёзные задачи надежностного анализа сложных систем с особенностями невозможно (если иметь в виду адекватность моделирования). Самым крупным «промахом» разработчиков RISK SPECTRUM является то, что не вычисляются двухсторонние оценки по любой одной конструкции (минимальным сечениям, или минимальным путям) и по любому дереву как отказов, так и успехов не определяются и минимальные сечения и минимальные пути (хотя это легко реализуемо). Применение этого комплекса если и возможно, то только для достаточно простого анализа и на самых ранних стадиях проектирования.

Обсуждать заблуждения кого бы то ни было (пусть даже И.А.Рябикина) в области марковского моделирования мы не будем. Без марковского моделирования, без статистического моделирования ни одна задача из области динамических моделей решена быть не может (напр., ненагруженный резерв, та же последовательность отказов и даже несовместность (задайте вопрос, откуда берутся эти вероятности несовместных отказов, если заданы законы распределения, да ещё неэкспоненциальные, да ещё с восстановлением)). Таких динамических задач вообще бесконечное множество в отличие от статических постановок и учитываемых в них факторов. Кое-что относительно марковского моделирования все же скажем. Возрастающая мощь вычислительной техники и автоматизация построения для некоторых случаев марковских моделей постепенно решают проблему размерности. Не только в RELEX реализованы эти методы (а то как же они решили целый ряд динамических задач, для которых мы не строили марковскую модель). Уже создан отечественный ПК УНИВЕРСАЛ основывающийся на марковском моделировании и позволяющий строить модели с десятком тысяч состояний (естественно не вручную). Помимо этого марковские модели можно «укрупнять», как точно (когда это возможно), так и приближенно (в противном случае). Алгоритмы эти разработаны, в том числе и нами. Применять такое моделирование надо не ко всей системе, а к отдельным частям, т.е. проводить декомпозицию, далее моделирование, далее агрегирование оценок показателей.

Представители ИПУ РАН предлагают, объединив усилия организаций, участвующих в данной работе, в течение нескольких ближайших лет провести разработку программного комплекса, содержащего как статические, так и динамические модели. Прекрасный аппарат задания моделей в виде СФЦ, объединяющий как блок-схемы (удобные для систем с явно выраженными функциональными структурами), так и деревья отказов/успехов, (удобные для анализа безопасности при отсутствии явно выраженных функциональных структур) необходимо дополнить динамическими моделями анализа и вычисления показателей. При желании можно сделать задание моделей и в виде блок-схем и в виде деревьев. Такая разработка будет соответствовать мировому уровню (а кое в чем и превосходить) и позволит не только в теоретическом плане быть “на уровне”, но и в практических разработках.

2. Заключение специалистов СПИК СЗМА

1. Мы считаем данное исследование актуальным и перспективным. Выражаем глубокую признательность коллегам за большой труд, предоставленные результаты, их глубокий и доброжелательный анализ. Это позволило обоснованно позиционировать созданные и используемые в Компании теорию, технологию и программные комплексы (ПК) автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ) в развитии данного научного направления в мире, осмыслить положительные и отрицательные стороны наших текущих результатов, скорректировать направления дальнейших работ, пути совершенствования и развития.
2. Результаты НИР подтвердили, что в области автоматизации процессов построения математических моделей надежности, безопасности и риска структурно сложных систем наибольшее практическое применение во всех трех рассмотренных технологиях нашли теоретические разработки, которые в отечественной науке получили наименование логико-вероятностных методов. Это высокое признание многолетнего труда основоположника и руководителя отечественной научной школы логико-вероятностного моделирования академика ИГОРЯ АЛЕКСЕЕВИЧА РЯБИНИНА [12, 13].
3. Выполненная разработка сводных таблиц сравнительных результатов для каждого из экспериментальных разделов 2.1- 2.12 данной НИР позволила сделать следующее обобщение:
 - во всех сводных таблицах приведены **179** показателей моделирования и расчета надежности, безопасности и риска систем, из которых **161** показатель (модели вычисления) определяется средствами технологии, реализованной в различных модулях ПК Relex Software;
 - **112** показателей получены с помощью программных модулей и утилит технологии АСМ;
 - из **112** показателей, определенных средствами технологии АСМ, значения **111** практически полностью совпали с результатами, полученными различными модулями ПК Relex;

Результат сравнительного анализа является, по нашему мнению, объективным подтверждением научной корректности теоретических основ и программных реализаций технологии и ПК АСМ, разработанных специалистами ОАО "СПИК СЗМА".

4. В настоящее время методы и средства технологии АСМ не позволяют автоматически строить ряд математических моделей и вычислять некоторые показатели, которые уже реализованы в технологиях Relex и Risk Spectrum (см. раздел 2.3 пример 2, раздел 2.4 пример 4, 6, 7, разделы 2.5 и 2.9). Для большинства указанных задач нами уточнены подходы, методы и средства их реализации в технологии и ПК АСМ. Работы по их внедрению осуществляются в Компании по перспективному и текущим планам разработки НТП.
5. Полученные в НИР результаты еще раз показали, что логическая полнота графических и аналитических (метод, алгоритм и программа "ЛОГ" [3, 4, 10, 11]) средств СФЦ обеспечивает реализацию в технологии и ПК АСМ всех возможностей основного аппарата моделирования – алгебры логики. Поэтому, средствами СФЦ в данной НИР были успешно представлены практически все типовые формы структурного описания систем – блок-схемы (см. рис.2.1.6, 2.2.6, 2.3.5, 2.4.4, 2.7.7, 2.8.3, 2.10.4, 2.12.2) деревья отказов (см. рис.2.7.8.а, 2.7.8.б, 2.7.14), деревья безопасности (см. рис.2.7.13), деревья событий (см. рис.2.11.1, 2.11.3) и комбинаторные звенья (см. рис.2.2.9, 2.2.10), и одна марковская модель (см. раздел 2.10, §2.10.3).
6. Разработка метода, алгоритма и программного модуля "ЛОГ" [10], являющегося (ядром) основой всех версий ПК АСМ [6, 8, 19 и др.], обеспечила возможность успеш-

- ного решения (на единой методической основе АСМ) всех задач логического моделирования систем в данной НИР, и получения прямых и инверсных, монотонных и немонотонных логических ФРС. Именно логически универсальный (в базисе операций "И", "ИЛИ", "НЕ") графический аппарат СФЦ и соответствующий метод, алгоритм и программный модуль ЛОГ, являются главной положительной, основой и отличительной особенностью технологии и ПК АСМ, разрабатываемых в ОАО "СПИК СЗМА".
7. Результатами данной НИР практически подтверждена возможность средств СФЦ технологии АСМ реализовать как прямую (блок-схемы, графы связности и т.п.) так и обратную (деревья отказов, деревья событий) структурную постановку задач (см. §2.7.3 и §2.12.3). Выбор прямого или обратного подходов для решения практических задач предоставляется пользователю технологии и ПК АСМ. Этот выбор удобен в тех случаях, когда рассматриваемые системы имеют существенно различающиеся по размерности и сложности прямые или обратные структурные модели. Например, прямую СФЦ (см. рис.2.1.6) системы электроснабжения (см. рис.2.1.1) разработать значительно легче, чем построить эквивалентное ей дерево отказов (см. рис.2.1.10). Вместе с тем, технология АСМ позволяет средствами СФЦ осуществлять все виды и обратной постановки задач, т.е. представлять деревья отказов, деревья событий и их совместные комбинации (см. рис.2.7.8.а, 2.7.8.б, 2.7.13, 2.7.14 и др.).
 8. В примере 8 §2.1.3, рассмотрена задача автоматического построения средствами технологии АСМ нового класса немонотонных логических и вероятностных моделей систем. Такие модели позволяют ставить и решать много важных специальных задач системного анализа надежности, безопасности и риска. Например, только с помощью немонотонных моделей возможен анализа систем "второго типа" (качественно-сложных), которые в разных несовместных состояниях характеризуются различными показателями эффективности или риска функционирования. Технология решения этого нового и перспективного класса задач в настоящее время реализована только в ОЛВМ и ПК АСМ.
 9. В технологии АСМ приоритетными являются точные аналитические методы автоматизированного логического, вероятностного моделирования и расчетов показателей надежности и безопасности систем. Поэтому все логические модели систем, полученные в примерах программными средствами различных технологий (Relex, АСМ и Risk Spectrum) полностью совпали. Результаты аналитических расчетов показателей надежности и безопасности, полученные средствами Relex и АСМ, практически полностью совпали в 111 случаях из 112 сопоставимых вычислений.
 10. Результаты решения примеров данной НИР показали, что различия точных расчетов показателей надежности и безопасности, полученные средствами Relex и АСМ, и приближенных расчетов, полученных средствами ПК Risk Spectrum, при вероятностях отказов элементов менее 0.01 ($q_i \leq 0.01$) как правило, незначительные. При $q_i > 0.01$ расхождения расчетов системных показателей могут быть существенными (см. табл.2.1.7, 2.1.15, 2.1.16). По нашему мнению, приближенные расчеты должны быть только вспомогательным средством анализа надежности и безопасности сложных систем в технологиях автоматизированного моделирования.
 11. Кроме указанных существует большое количество других специальных направлений развития теории и технологии автоматизированного структурно-логического моделирования, над которыми сейчас работают специалисты ОАО "СПИК СЗМА". Эти направления во многом определяются объективными потребностями практики в адаптации данной технологии и ПК АСМ к решению задач автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности и безопасности специальных системных объектов в различных отраслях промышленного производства. Одним из таких важных направлений является, по нашему мнению, разработка специализированных программных систем комплексного автоматизированного моделирования и оценки ожидаемого ущерба от возможных аварий на опасных производственных объектах. Главная особенность

этого направления заключается в эффективном объединении методов и средств автоматизированного моделирования и расчета вероятностных характеристик сценариев развития аварий с методами и средствами автоматизированного моделирования и расчета возможных последствий аварий на опасных производственных объектах [26].

3. Заключение специалистов СПБАЭП

1. В результате выполнения НИР получен ценный практический материал, позволяющий производить сравнительную оценку различных подходов к автоматизированному моделированию и расчету показателей надежности и безопасности сложных технических систем. Значимость и достоверность результатов работы во многом определена тем, что кроссверификация сравниваемых кодов производилась специалистами трех организаций, каждая из которых была заинтересована в отстаивании и защите своих методов. Это практически исключило возможность односторонних оценок, предвзятость оценок и т.п.

2. По существу все три сравниваемых программных комплекса используют одну и ту же методологию моделирования, подразумевающую поэтапное построение моделей надежности и безопасности разного вида:

- формализация модели с помощью графов того или иного вида;
- автоматическое преобразование графической модели в функцию алгебры логики;
- автоматическое преобразование логической функции в расчетный вероятностный многочлен (вероятностную функцию);
- производство расчетов требуемых показателей надежности и безопасности.

В то же время пути реализации данной технологии на практике отличаются, что во многом сказывается на адекватности получаемых результатов.

3. Код Risk Spectrum реализует практически классическую технологию формализованной постановки задачи моделирования с помощью деревьев событий и деревьев отказов. Нельзя не согласиться с мнением специалистов СПИК СЗМА о том, что данная технология имеет ряд недостатков. Как следует из результатов решения рассмотренных в НИР примеров, графические модели одних и тех же систем, представленные в виде деревьев отказов, значительно более громоздки, чем блок-схемы и СФЦ. Это вызывает и относительно большую трудоемкость их построения. Возможно, именно этим обстоятельством вызвано то, что в коде Relex для графического моделирования используются и деревья отказов и блок-схемы. В этой связи использование аппарата СФЦ, позволяющего моделировать как прямую, так и обратную логику рассуждений является более предпочтительным.

4. К сожалению, в коде Risk Spectrum не реализована возможность использования одной из базовых логических операций – операции отрицания, что снижает качество получаемых моделей. В двух других кодах эта возможность реализована, причем в коде Relex – при использовании деревьев отказов.

5. Все три кода позволяют автоматически получать по исходному графу логическую функцию неработоспособности системы. В то же время коды АСМ и Relex позволяют автоматически получать и логические функции работоспособности, что в ряде случаев является важным преимуществом.

6. Код АСМ обеспечивает преобразование логической функции в вероятностную функцию, представляемую в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме, что исключает потерю точности при вероятностных расчетах. В коде Risk Spectrum для этих целей используются аппроксимирующие приближения, обеспечивающие получение только приближенных оценок показателей надежности и безопасности. При анализе надежности и безопасности систем, состоящих из высоконадежных элементов (вероятность отказа $q_i \leq 0.001$), применение данного подхода, в принципе, допустимо, однако при использовании в составе систем оборудования с низкой надежностью расчеты с помощью Risk Spectrum дают завышенные (иногда чрезмерно завышенные) оценки вероятности отказа, что может приводить к принятию неверных проектных и иных решений.

Указанный недостаток кода Risk Spectrum особенно ярко проявляется при анализе надежности персонала, т.к. вероятности ошибок персонала, как правило, имеют высокие значения. В то же время, как известно, вклад ошибок персонала в ЧПЗ, особенно в стояночных

режимах, весьма высок (особенно для стояночных режимов: 96% - для Тяньваньской АЭС, около 100% - для 3-го блока Калининской АЭС).

Судя по результатам решения примеров, код Relex обеспечивает получение точных результатов расчетов, однако из материалов НИР, представленных специалистами ИПУ, не ясно, каким образом это достигается.

7. Специалисты СПИК СЗМА и СПБАЭП отрешали все примеры с помощью одной и той же (в зависимости от используемой в данной организации) технологии. Специалисты ИПУ РАН использовали целый ряд технологий. С одной стороны, это подчеркивает достоинства кода Relex, однако с другой стороны – не позволяет сравнить, например, достоинства и недостатки технологии ДС/ДО, реализованной в кодах Relex и Risk Spectrum. Учитывая, что при выполнении ВАБ объектов ядерной энергетики технология ДС/ДО является стандартом де-факто (особенно на Западе), это является определенным недостатком (в рамках данной НИР).

8. Как следует из результатов НИР, код Risk Spectrum обеспечивает возможность использования более сложных, чем традиционно применяемые, моделей надежности элементарных событий, например, моделей, учитывающих принятую на АЭС стратегию периодических проверок и восстановлений элементов, входящих в различные каналы систем безопасности. На наш взгляд это большее достоинство, чем возможность использования закона Вейбулла-Гнеденко и т.п., особенно, если учитывать всем известную проблему со сбором статистических данных по надежности оборудования. В атомной энергетике, где применяется высоконадежное и малосерийное оборудование, вряд ли когда-нибудь удастся корректно определять параметры масштаба и формы 2-параметрических законов распределения. А это ставит под сомнение ценность их использования при решении практических задач анализа надежности и безопасности АЭС.

9. Важным достоинством кода Risk Spectrum является, на наш взгляд, его ориентация на решение задач большой размерности. Известно, что модели безопасности таких сложных объектов, как АЭС включают огромное количество элементов (В модель безопасности АЭС «Бушер», например, входят 84 дерева событий, 984 дерева отказов, 2678 операторов, 3399 базовых событий, 73 функциональных событий, 205 групп ООП). Решение задач такой размерности, как известно, связано с целым рядом проблем. К сожалению, в данной НИР не ставилась задача сравнения кодов при анализе надежности и безопасности больших систем.

10. Судя по косвенным данным, ядро кода Risk Spectrum работает (фактически) в среде операционной системы MS DOC, что накладывает сильные ограничения на размерность моделей безопасности и приводит к грубым ошибкам расчета, связанным с отсечением, так называемых «малозначащих сечений». Код АСМ СЗМА лишен данного недостатка. Код NEWАСМ решает указанную задачу за счет корректного решения задачи полуавтоматической декомпозиции. Как решена данная задача в коде Relex, по результатам НИР определить не представляется возможным.

4. Общее заключение специалистов ИПУ РАН, СПИК СЗМА и СПБАЭП

1. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что основная цель настоящей исследовательской работы реализована – получены обоснованные качественные и количественные характеристики трех технологий автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности и безопасности структурно-сложных систем:
 - технологии и программных средств автоматизированного моделирования показателей надежности и безопасности (программный комплекс Relex Компании Relex Software, США), используемый специалистами ИПУ РАН.
 - технологии автоматизированного структурно-логического моделирования, (программные комплексы ПК АСМ, разработанные и применяемые ОАО "СПИК СЗМА", Россия), для оценки надежности и безопасности промышленных объектов;
 - технологии деревьев отказов и деревьев событий (программный комплекс Risk Spectrum фирмы Relkon АВ, Швеция), применяемой ФГУП "СПБАЭП" для проведения вероятностного анализа безопасности (ВАБ) и расчета показателей надежности систем проектируемых атомных электростанций (АЭС).

Все указанные технологии и программные комплексы пригодны для использования по предусмотренному назначению в пределах отмеченных в технической документации допущений и ограничений.
2. Актуальной является разработка отечественных программных комплексов промышленного назначения для автоматизированного моделирования и расчета статических и динамических показателей надежности и безопасности сложных систем, что обусловлено:
 - объективными потребностями развивающейся отечественной промышленности в повышении конкурентоспособности продукции (обеспечении современного уровня качества, надежности и безопасности) при создании новых высокотехнологичных процессов и оборудования, особенно для опасных производственных объектов различного назначения;
 - объективными трудностями использования для этих целей программных комплексов зарубежной разработки, связанными с их высокой стоимостью, технологической зависимостью, проблемами подготовки кадров, модернизации и адаптации к новым предметным областям, использованию в оборонной промышленности;
 - необходимостью поддержания высокого уровня отечественной науки и внедрения в производство новых информационных технологий решения проблем обеспечения надежности и безопасности разрабатываемых систем различных видов, классов и назначения.
3. Считаю целесообразным, объединить усилия организаций-исполнителей данной работы и приступить к разработке на базе ОЛВМ, технологии и ПК АСМ СЗМА отечественных специализированных программных комплексов автоматизированного структурно-логического статического и динамического моделирования, расчета показателей и оптимизации надежности, безопасности и риска функционирования сложных систем для различных отраслей промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викторова В.С., Кунтшер Х., Петрухин Б.П., Степанянц А.С. Relex - программа анализа надежности, безопасности, рисков. // "Надежность" №4(7), 2003, с. 42-64
2. Relex - программа анализа надежности, безопасности, рисков. Компания Relex Software Corporation (США). Данные получены из Internet, сайт: <http://www.relexsoftware.de/rus/wmain.htm>.
3. Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988. -68с.
4. Mozhaev A.S. Theory and practice of automated structural-logical simulation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). Tom 3. St.Petersburg: SPIRAS, 1997, p. 1109-1118.
5. Можяев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. СПб. ВИТУ, 2000. -145с.
6. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА). СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611101 об официальной регистрации программ. Автор: Автор: Можяев А.С. Правообладатель: ОАО "СПИК СЗМА". М.: Роспатент РФ, 2003. Internet сайт: <http://www.szma.com>.
7. Нозик А.А., Можяев А.С., Потапычев С.Н., Скворцов М.С. Программный комплекс автоматизированного моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования. // Материалы III Международной научно-практической конференции: "Моделирование. Теория, методы и средства". Часть 1. Новочеркасск: НИИ, 2003, С.28-35.
8. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611099 об официальной регистрации программ. Авторы и правообладатели: Можяев А.С., Гладкова И.А. М.: Роспатент РФ, 2003.
9. Можяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной научной школы: "Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах" (МА БРК – 2001). СПб.: ООО "НПО Омега", 2001, с.56-61..
10. Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ & ВФ). СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611100 об официальной регистрации программ. Авторы: Можяев А.С., Гладкова И.А. Правообладатель: Можяев А.С.. М.: Роспатент РФ, 2003.
11. Можяев А.С. Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем. // Труды Международной научной школы: "Моделирование и анализ безопасности, риска в сложных системах" (МА БР – 2003). СПб.: СПбГУАП, 2003, С.101-110.
12. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981.
13. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
14. Константинов Б.А., Лосев Э.А. Логико-аналитический метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения. // "Электричество", №12. 1971.

15. Ибадулаев В.А Оценка последствий химических аварий на транспортных коммуникациях. // Журнал Коллегии: "Промышленная безопасность труда" 1(16/2004). М.: Берг-коллегия, 2004, С.31-32.
16. Risk Spectrum. Руководство по теории. // Техническая документация к программному комплексу фирмы By Relcon AB. -58с.
17. Risk Spectrum Professional. Руководство пользователя. // Техническая документация к программному комплексу фирмы By Relcon AB. -119с.
18. Программный комплекс Risk Spectrum вероятностного анализа надежности и безопасности систем. Разработан Шведской фирмой Relcon AB. Форма исходной структурной схемы системы – дерево отказов. Данные получены из Internet, сайт <http://www.riskspectrum.com>.
19. Можаяев А.С., Ершов Г.А, Татусьян О.В. Автоматизированный программный комплекс для оценки надежности систем. (ПК АСМNEW, версия 2.01) СПб.: ВВМИУ им. Ф.Э. Дзержинского, 1994.
20. Ершов Г.А., Козлов Ю.И., Солодовников А.С., Можаяев А.С. Оценка безопасности атомных энергетических объектов на стадии проектирования. // Тяжелое машиностроение 8/2004. М.: ТМ, 2004, С.33-39.
21. Ершов Г.А., Козлов Ю.И., Татусьян А.О. Сравнительный анализ способов моделирования безопасности АЭС с помощью метода "ДС-ДО", ГО-метода, и общего логико-вероятностного метода. // Доклад на конференции "Практика разработки ВАБ и использования их результатов на действующих и вновь проектируемых АЭС". М.: МАЭП, 2002. -20с.
22. Анализ существующих отечественных и зарубежных методов и методик проведения ВАБ и обоснование общей методологии ВАБ корабельных ЯЭУ. Научно-технический отчет. Российский научный центр "Курчатовский институт" / Институт ядерных реакторов. М.: 2002. -39с.
23. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Выпуск 10. М.: ГУП "НТЦ ПБ" Госгортехнадзора России, 2001. -60с.
24. Устинов В.С., Исламов Р.Т. и др. Методика квантификации, анализа значимости, чувствительности и неопределенности при проведении вероятностного анализа безопасности корабельных ядерных энергетических установок. (Шифр темы "ЗАОЧНИК"). М.: РНЦ "Курчатовский институт", 2003. -30с.
25. Швыряев Ю.В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. М.: ИАЭ им. И.В.Курчатова, 1992. -266с.
26. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. Сборник документов Госгортехнадзора России. Серия 27. Декларирование промышленной безопасности и оценка риска. Выпуск 2. М.: НТЦ "Промышленная безопасность", 2002, -206 с.
27. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности. Киев: КМУГА, 1997. – 426 с.