

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

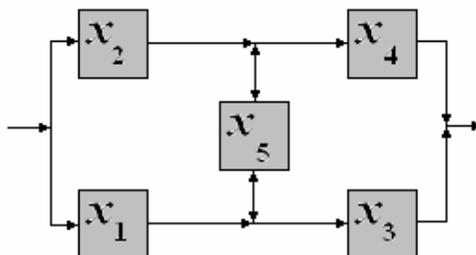


Рис. 2.4.1. Функциональная схема мостиковой системы

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.

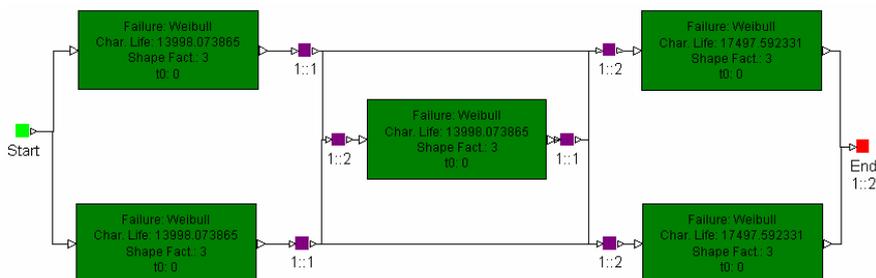


Рис. 2.4.2. Блок-схема для автоматизированного моделирования и расчета надежности мостиковой системы в Relex RBD

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
Ti=12500ч (i =1,2,5) Ti = 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)
Ti = 12500ч (i = 1,2,5) Ti = 15625ч (i = 3,4)	Tvi =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, $T_{\text{между}}=477949,55\text{ч}$.

Среднее время восстановления системы может быть получено как

$$\text{MTBF} - 1/\text{Hazard Rate} = 49.8\text{ч}.$$

Для вероятности безотказной работы определяется нижняя оценка.

Пример 3. Расчет надежности невозстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработки 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
$\eta_i = 17497.592331\text{ч}$ ($i = 3,4$)	0.8624	13513
	0.8616	13506

Пример 4. Расчет надежности восстанавливаемой мостиковой системы с распределением Вейбулла наработки 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 наработки 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.

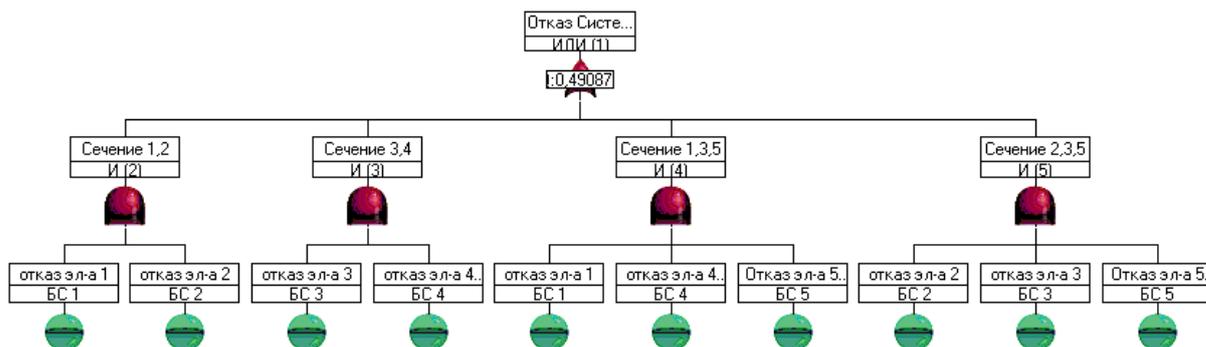


Рис. 2.4.3. Дерево отказов мостиковой системы

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

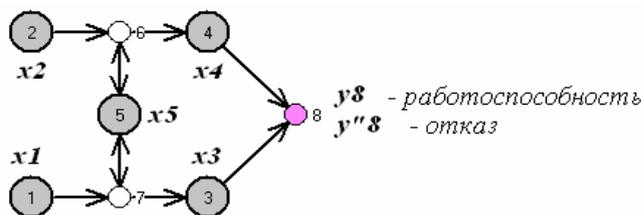


Рис. 2.4.4. СФЦ мостиковой системы

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

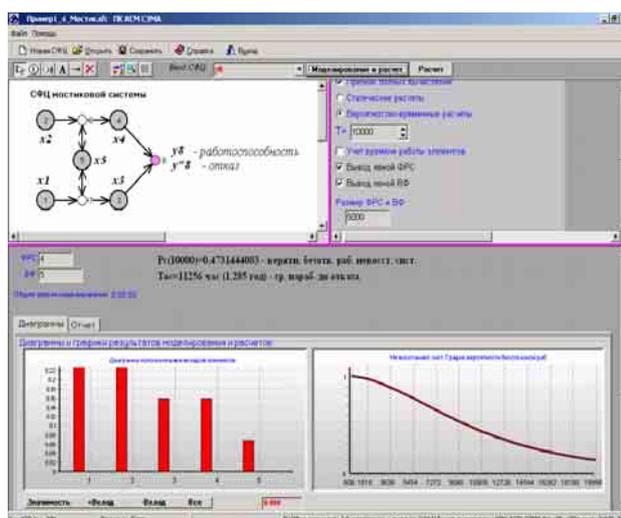


Рис. 2.4.4. Результаты решения задачи «мостик» на ПК САМ СЗМА

Вычисленные ПК АСМ СЗМА значения вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа мостиковой системы практически совпали с результатами, полученными с помощью модуля Relex 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

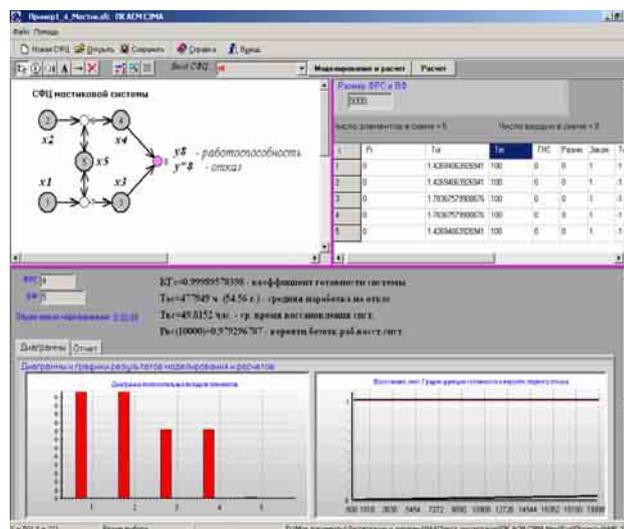


Рис. 2.4.5. Результаты решения задачи «мостик» на ПК САМ СЗМА (с учетом восстановления элементов)

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.

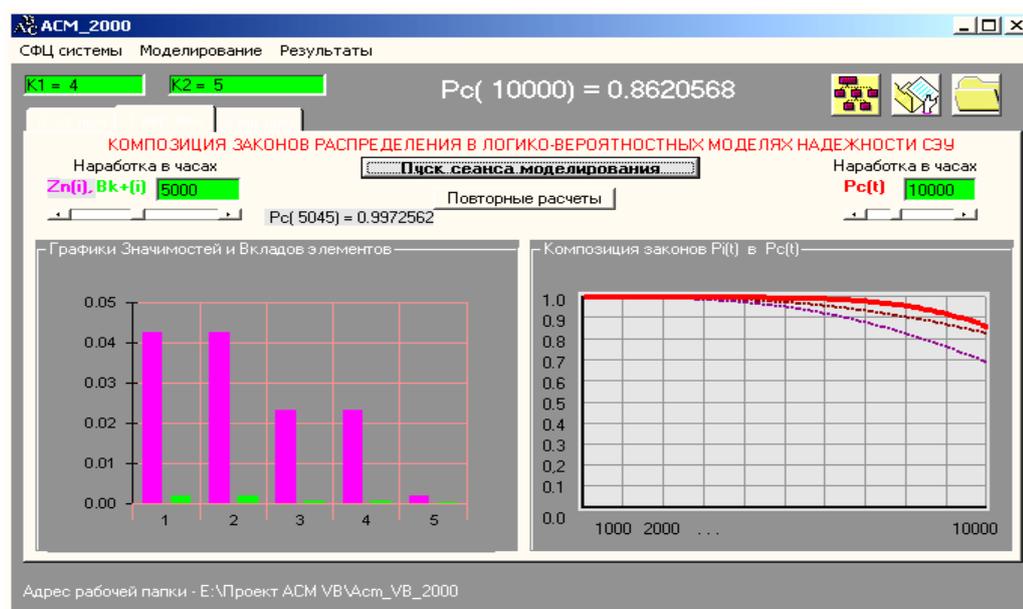


Рис. 2.4.6. Рабочее окно утилиты композиции различных законов распределения вероятностей безотказной работы элементов системы

Полученный в технологии АСМ 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 АСМ 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 АСМ 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 невосстанавливаемой 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 АСМ 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 невосстанавливаемой 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.

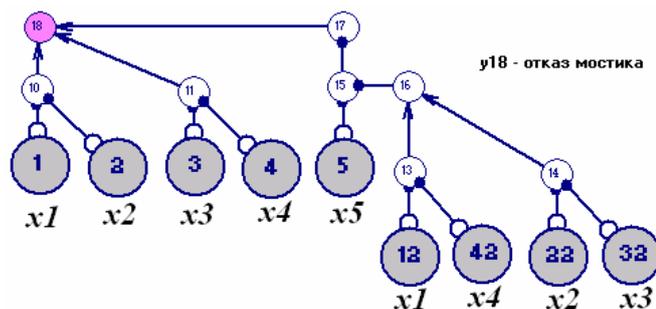


Рис. 2.4.7. СФЦ мостиковой схемы, аналогичная дереву отказов на рис.2.4.10

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):

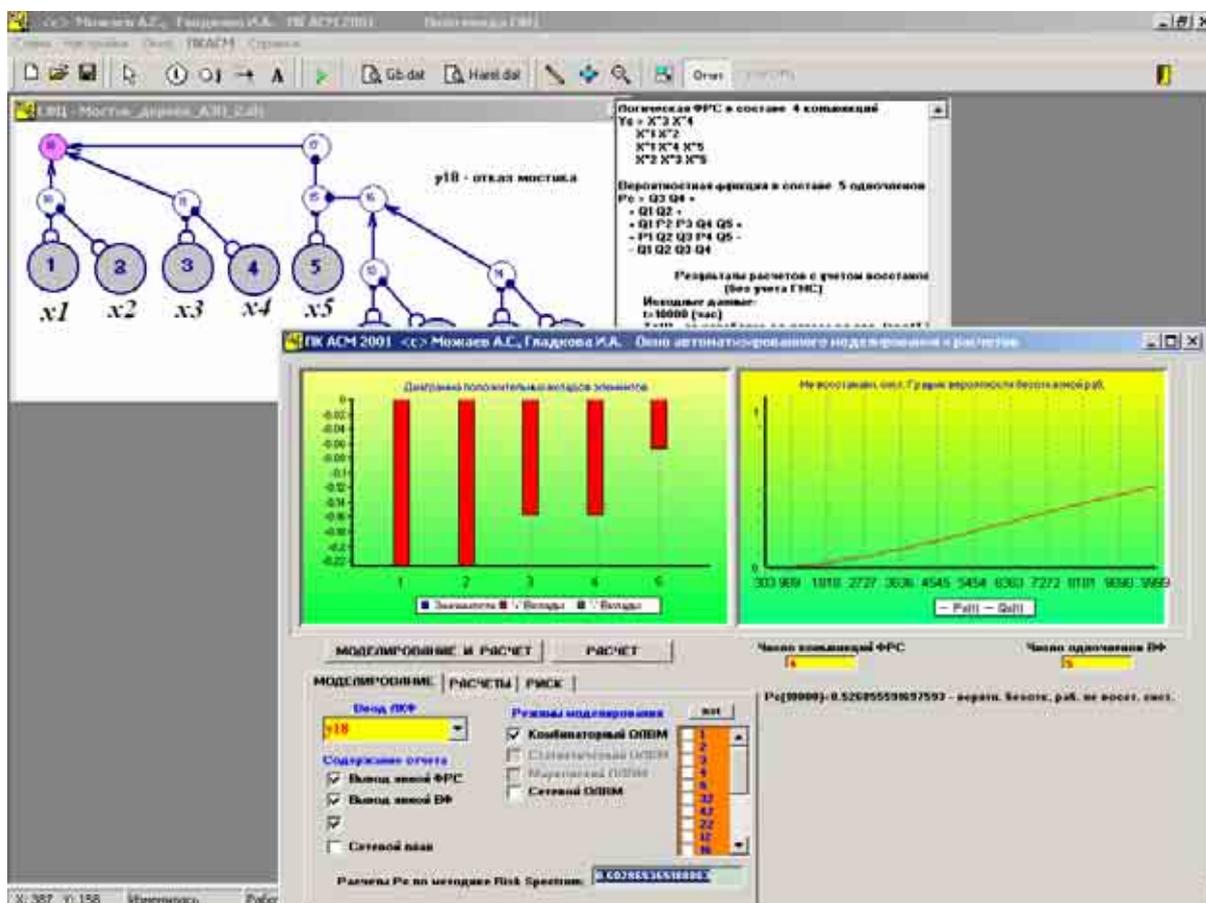


Рис. 2.4.8. Результаты решения по СФЦ, аналогичной дереву отказов

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

$$Q_c(10\ 000 \text{ ч.}) = 0.526855591698.$$

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

$$P_c(10\ 000 \text{ ч.}) = 1 - Q_c = 1 - 0.526855591698 = 0.473144408302,$$

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).

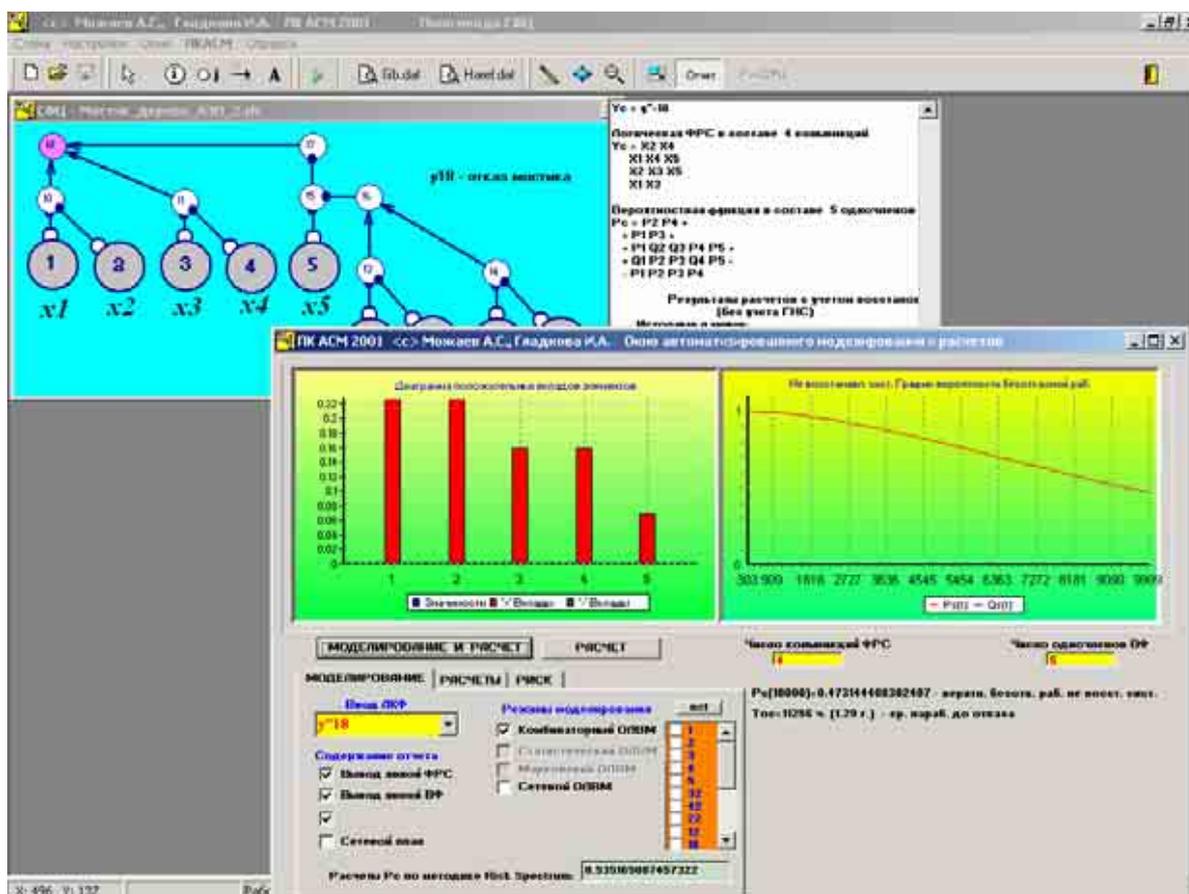


Рис. 2.4.9. Результаты анализа работоспособности мостиковой системы на основе СФЦ дерева отказов

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)

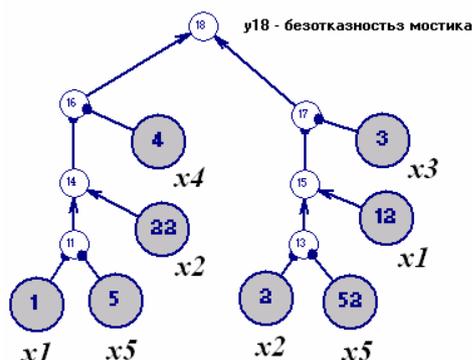
0.602865365188863.

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).

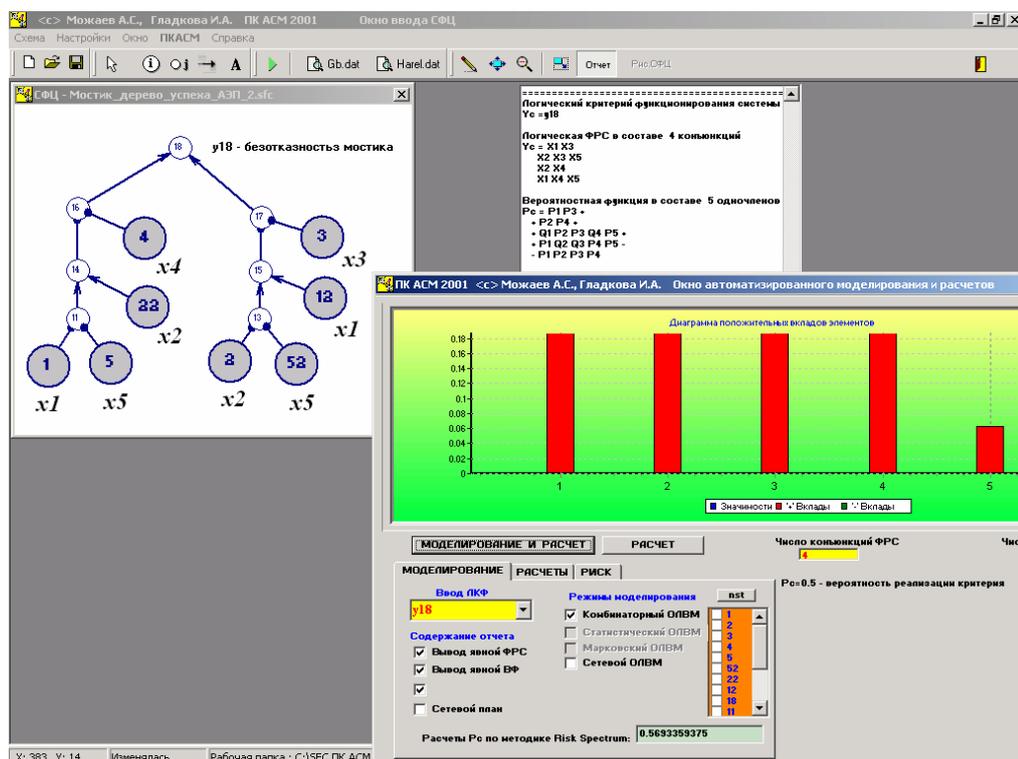
Пример 9. Решение на ПК АСМ прямой задачи «Мостик» на основе СФЦ дерева "успеха"

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)

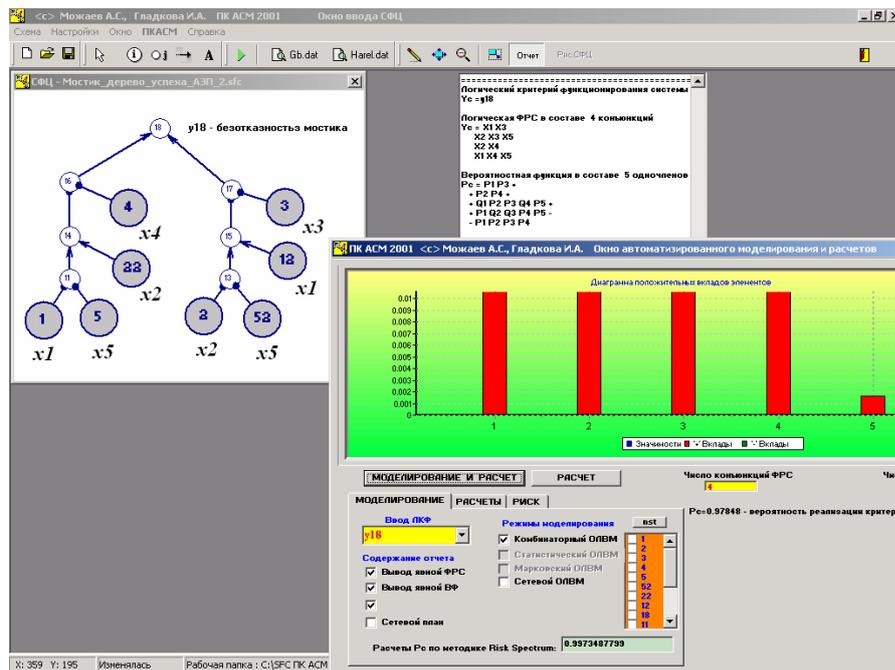


2. Результаты автоматизированного моделирования и расчета вероятности безотказной работы на ПК АСМ 2001 при заданной вероятности безотказной работы элементов системы $p_i = 0.5$ приведены на следующем рисунке



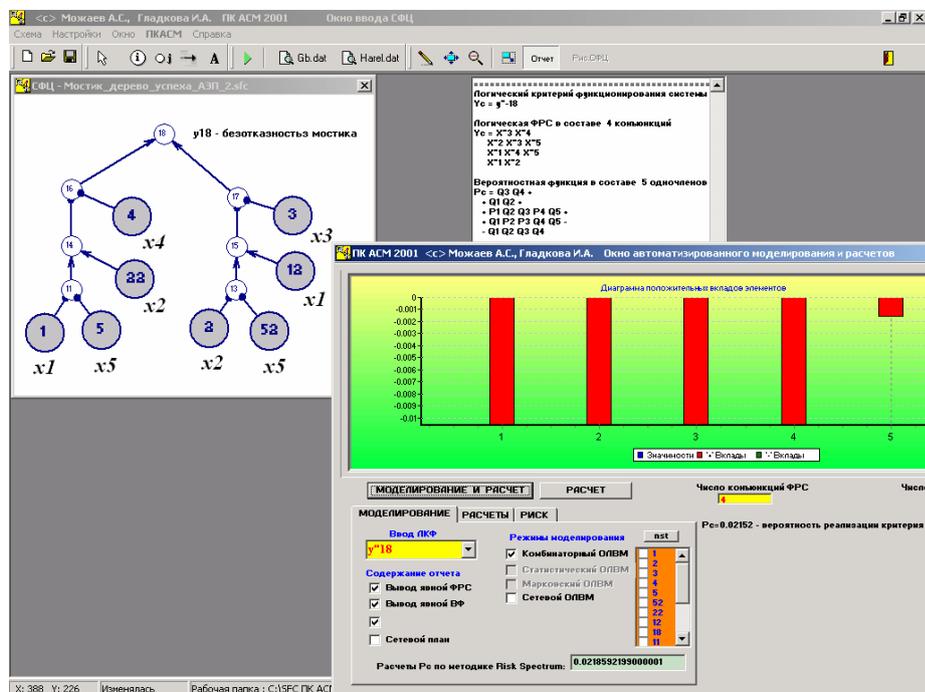
Вероятность безотказной работы данной системы, полученная на ПК АСМ 2001 и других комплексах, реализующих технологию АСМ (ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ весия 0.5, ПК АСМ NEW, ПК АСМ NEW 3) составила величину **0.5**. На ПК Risk Spectrum получены завышенные значения вероятности безотказной работы этой системы – **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.



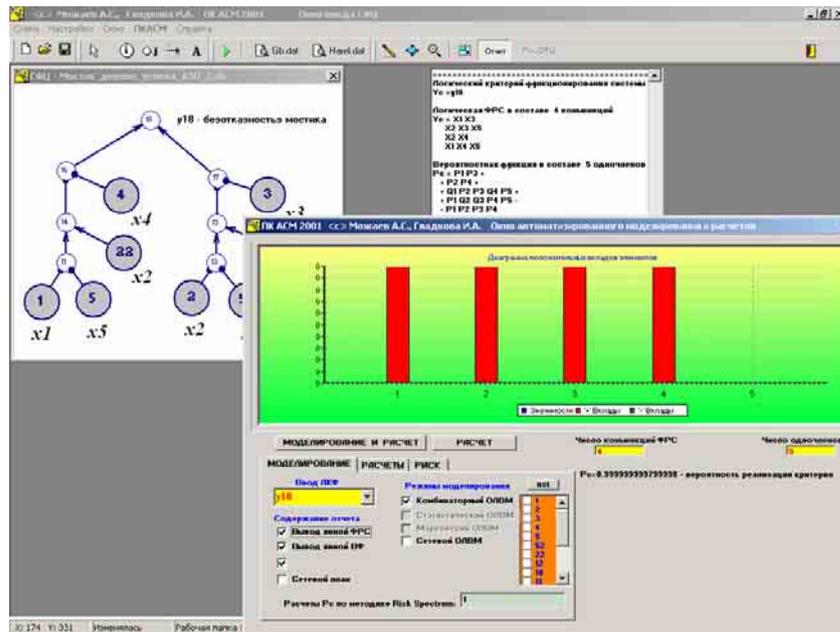
Точное значение вероятности безотказной работы составило **0.97848**. На ПК Risk Spectrum опять получено завышенное значения вероятности безотказной работы этой системы – **0.9973** при использовании первого уровня аппроксимации (см. §2.4.4, Пример 3).

4. Результаты решения на ПК АСМ обратной задачи на основе критерия $y''18$ отказа системы составили



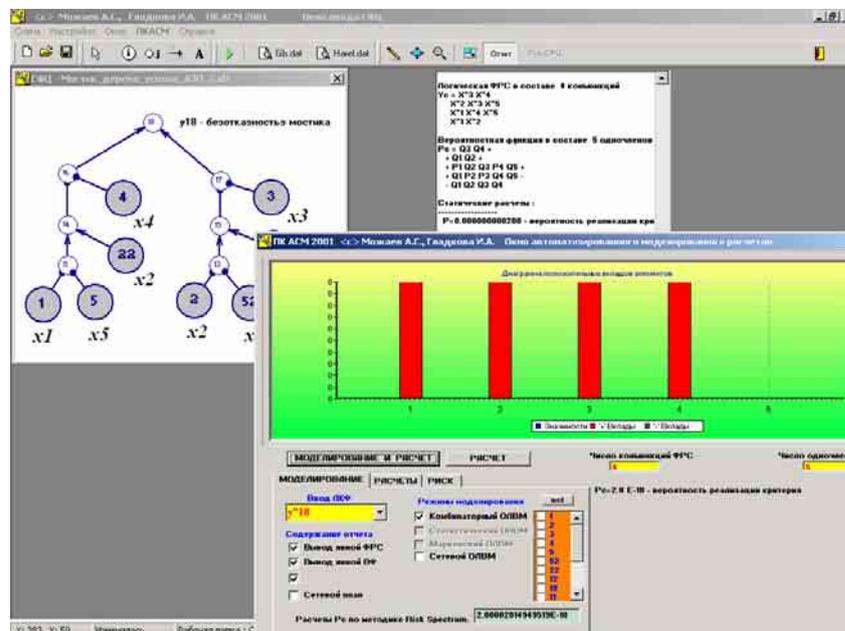
Точное значение вероятности отказа системы составило **0.02152**. На ПК Risk Spectrum опять получены завышенные значения вероятности отказа этой системы – **0.02186** при использовании первого уровня аппроксимации, и **0.02179** – при 3-м уровне аппроксимации (см. §2.4.4, Пример 3).

5. Расчеты на ПК АСМ для значений параметров элементов $p_i = 0.99999$ дали следующие результаты.



Точное значение вероятности безотказной работы составило **0.99999999700008**. 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.

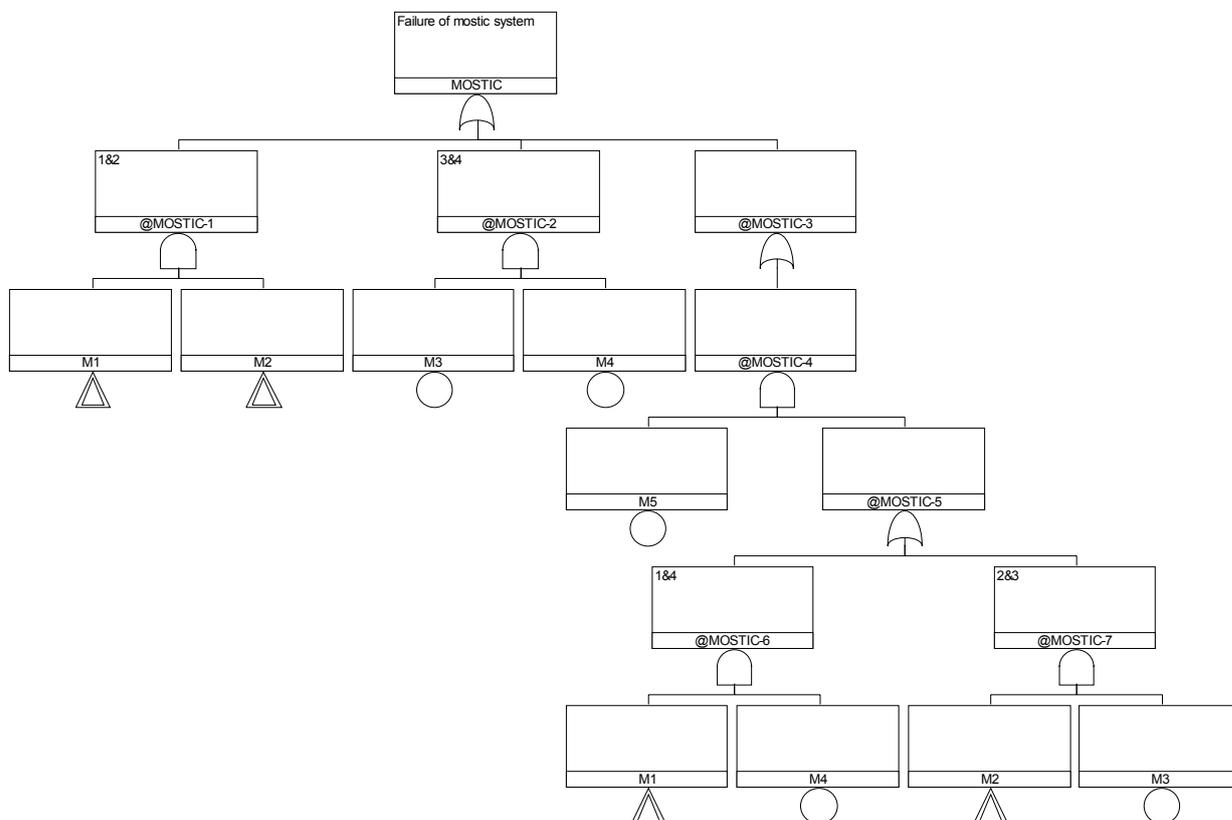


Рис. 2.4.10 Дерево отказов для задачи «Мостик»

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)
$T_i = 12500 \text{ ч } (i = 1, 2, 5)$ $T_i = 15625 \text{ ч } (i = 3, 4)$ $T_c = 10\ 000 \text{ час}$	0.6029 (1-й уровень аппроксимации) 0.5642 (3-й уровень аппроксимации)

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
$T_i = 12500\text{ч}$ ($i = 1,2,5$) $T_i = 15625\text{ч}$ ($i = 3,4$)	$T_{vi} = 100\text{ч}$ $(i = 1 \div 5)$	$1.042\text{E-}4$ 0.999999901167

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.

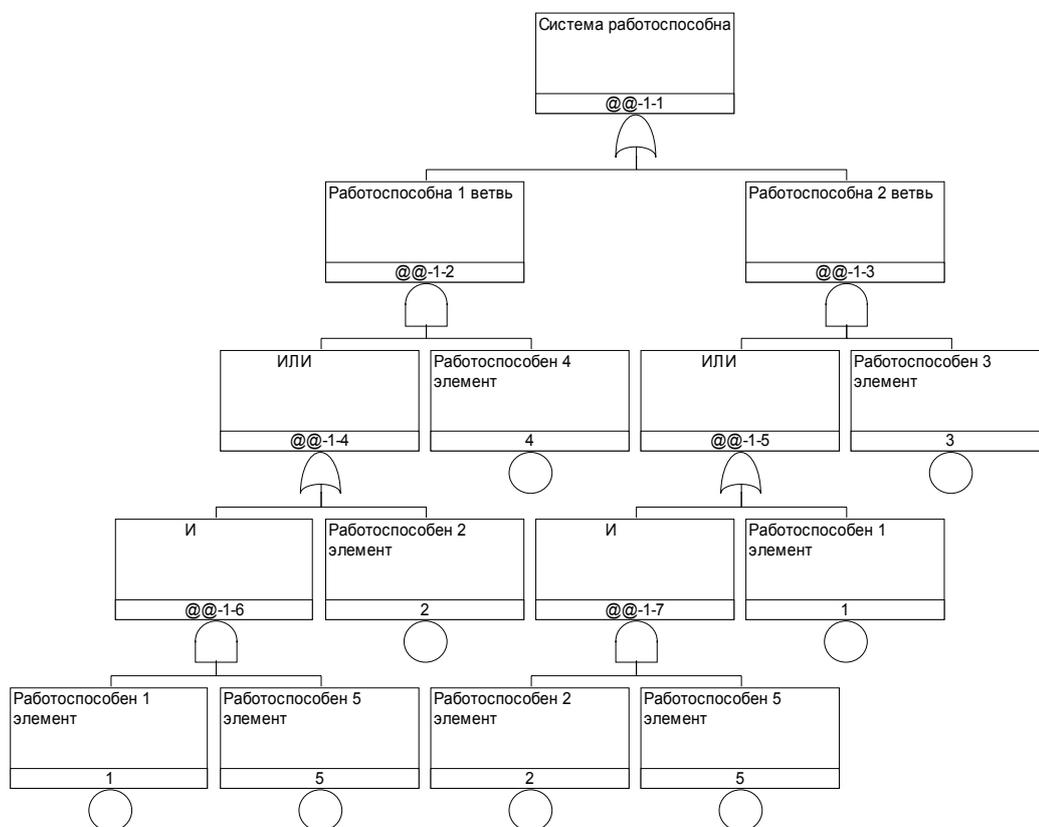


Рис. 2.4.11. Дерево «успеха» для задачи «Мостик»

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.

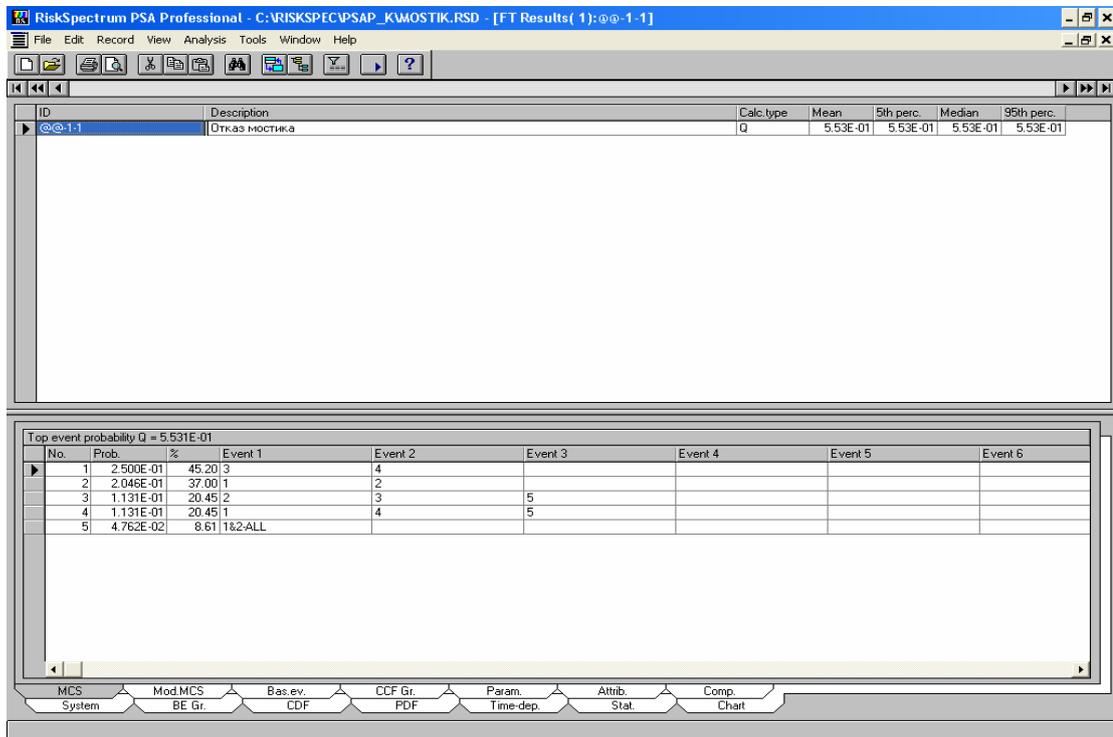


Рис. 2.4.12. Результаты расчетов надежности мостиковой схемы с учетом ООП при вероятности отказа элементов 0.5.

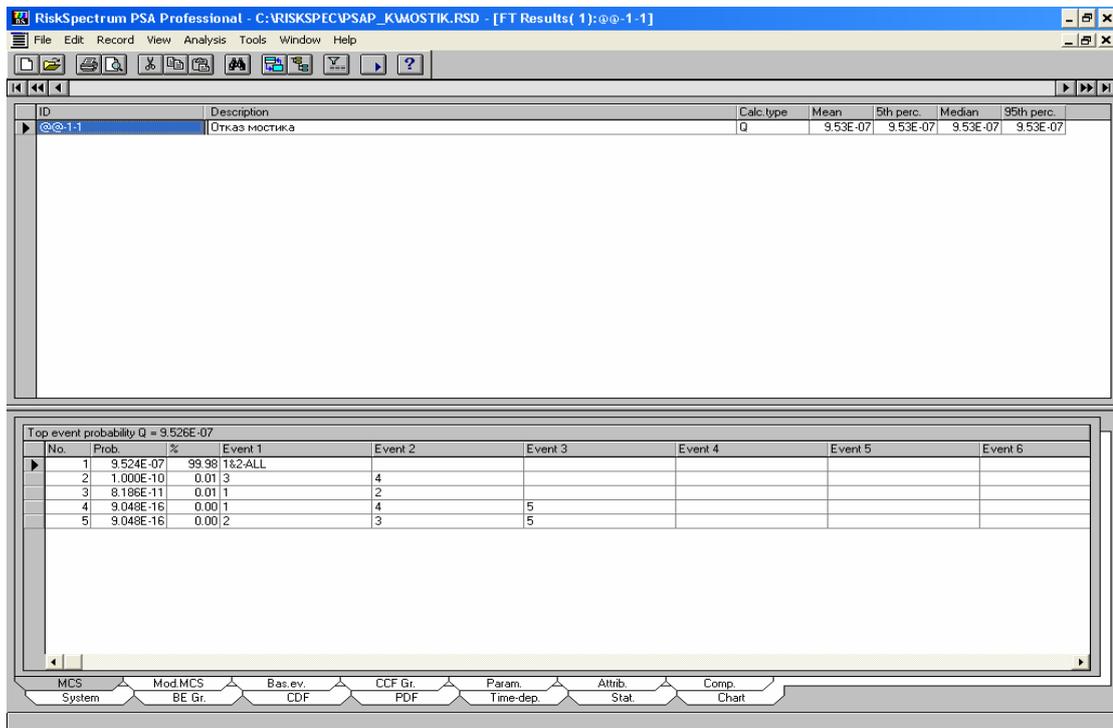


Рис. 2.4.13. Результаты расчетов надежности мостиковой схемы с учетом ООП при малой вероятности отказа элементов.

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.

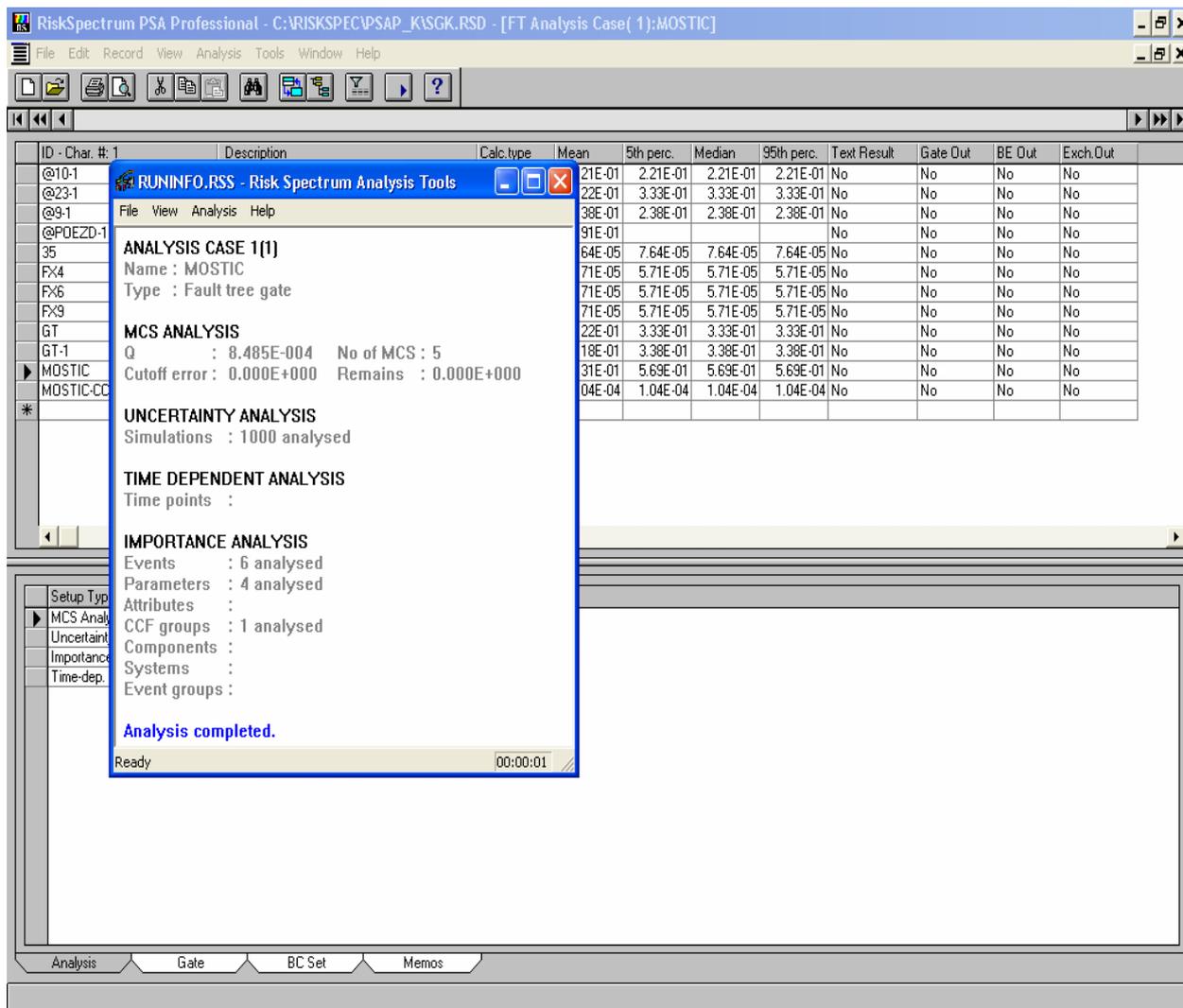


Рис. 2.4.14. Результаты расчетов надежности восстанавливаемой мостиковой схемы с учетом ООП.

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 ($\lambda_{1,2,5} = 8 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_{3,4} = 6.4 \cdot 10^{-5}$, $T_{B1-5} = 100$ 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 $2.151 \cdot 10^{-3}$ (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 $2.151 \cdot 10^{-3}$.

При условии, что элемент №5 (перемычка) не восстанавливается, вероятность отказа системы составила $4.215 \cdot 10^{-3}$ и $4.117 \cdot 10^{-3}$ 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			
		Relx	ПК АСМ	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 восстанавливаемой 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 восстанавливаемой 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 = 11603.97208 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 ($i=1\div 2$)		0.5531 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	0.9999999997	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 невозстанавливаемой 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 программного 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.