

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.

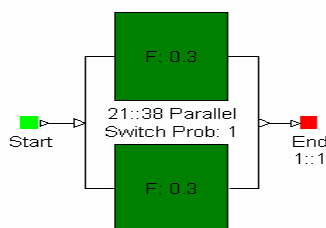


Рис. 2.2.1. Блок-схема комбинаторной подсистемы 21 из 38

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

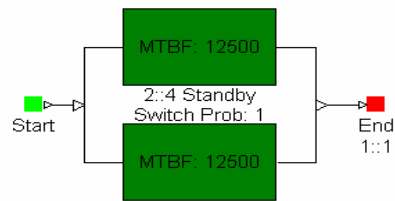


Рис.2.2.2. Блок-схема системы с резервированием замещением

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.

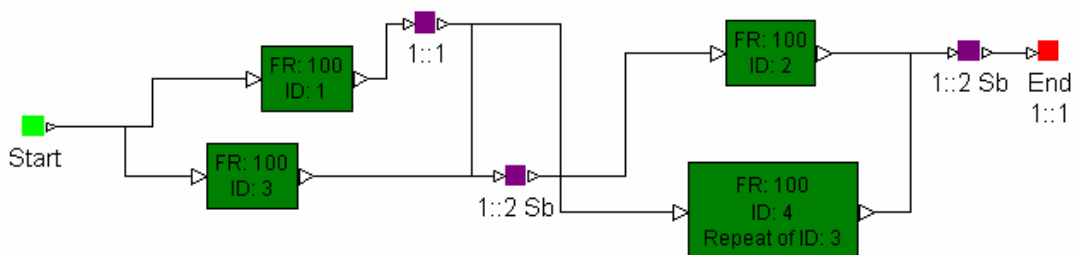


Рис.2.2.3. Блок-схема системы со скользящим резервированием

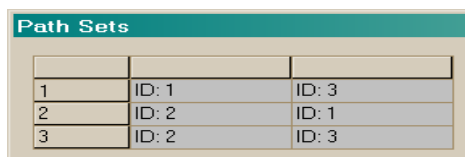
Результаты расчета представлены с таблице 2.2.3

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 АСМ, Relex RBD и Risk Spectrum. Результаты АСМ 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 АСМ вычисления указанных характеристик производились с помощью расчетной утилиты Aggregation_k_of_n. Вид рабочего окна этой утилиты приведен на рисунке 2.2.5.

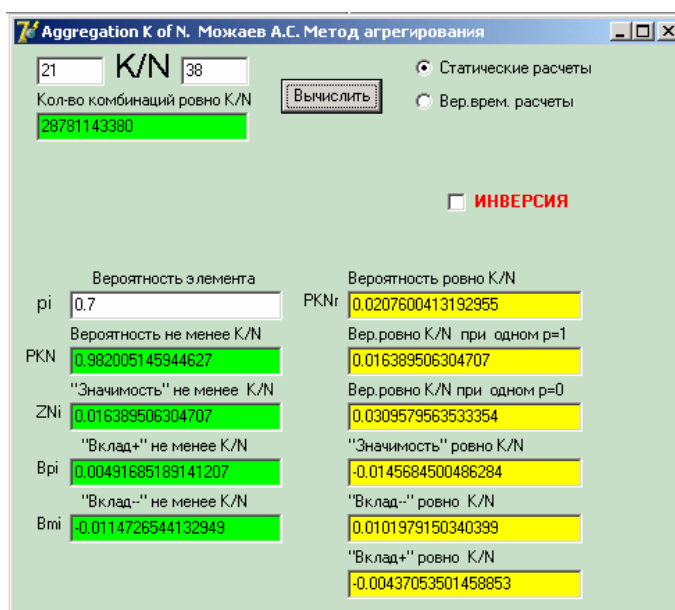


Рис. 2.2.5. Рабочее окно утилиты Aggregation_k_of_n

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.

1. Непосредственно с помощью ПК АСМ. На рисунке 2.2.6 изображено рабочее окно ПК АСМ СЗМА с результатами решения этого примера.

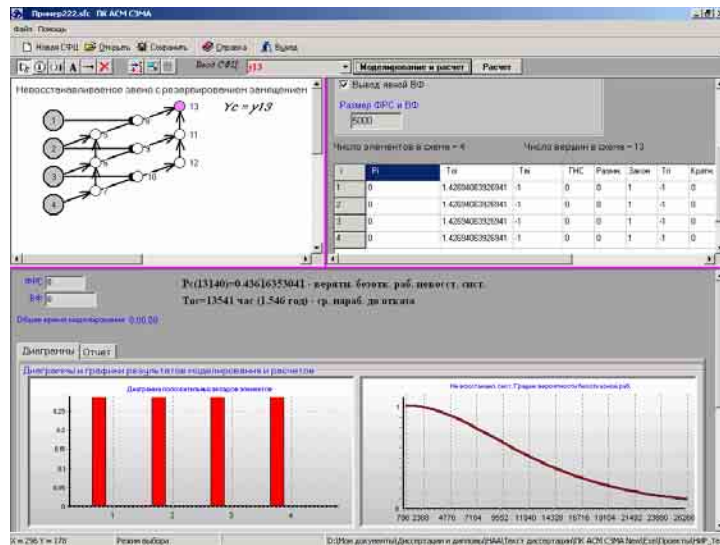


Рис. 2.2.6. Рабочее окно ПК АСМ СЗМА

2. С помощью расчетной утилиты Aggregation_k_of_n:

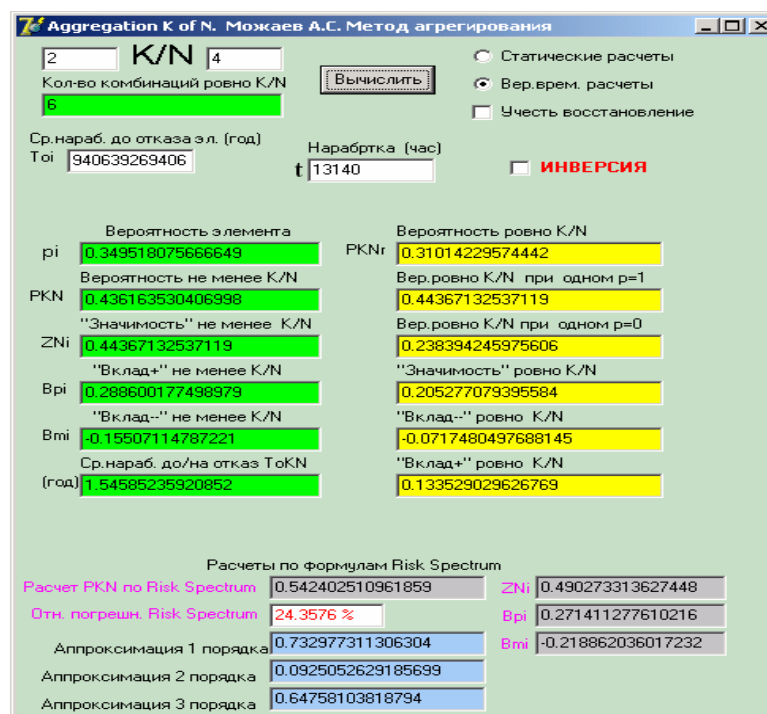


Рис. 2.2.7. Рабочее окно утилиты Aggregation_k_of_n

3. С помощью моделирующей утилиты Plotter_k_of_n:

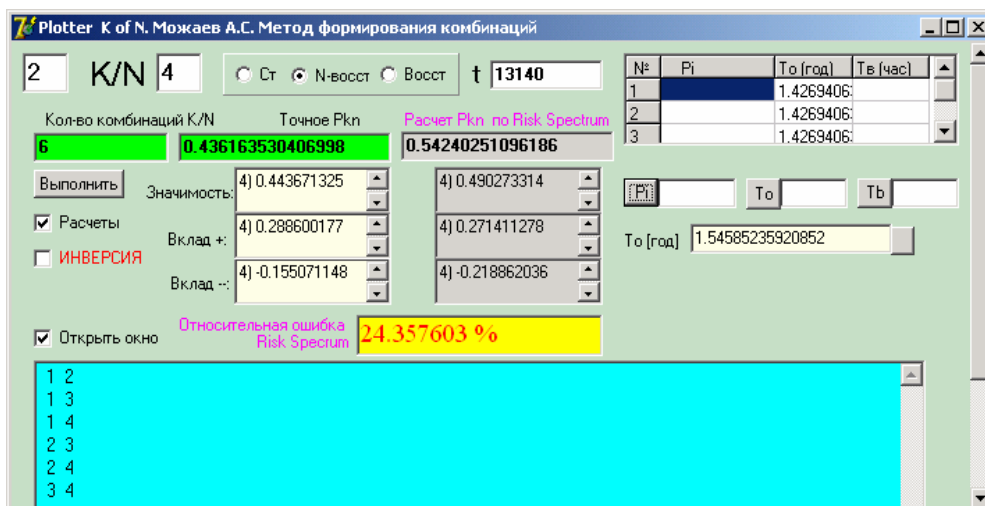


Рис.2.2.8. Рабочее окно утилиты Plotter_k_of_n

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.

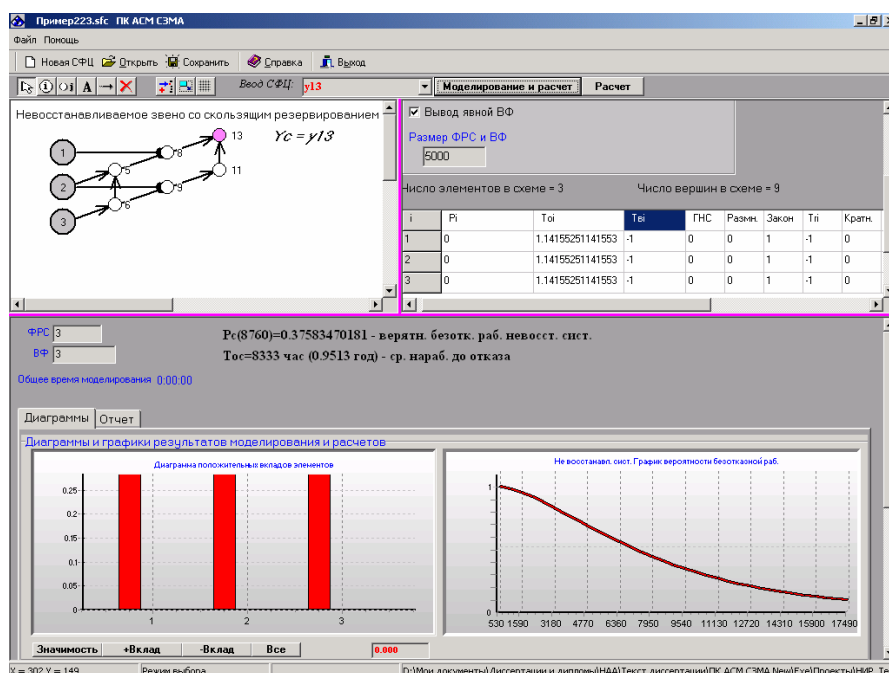


Рис. 2.2.9. Результаты расчетов с помощью ПК АСМ СЗМА

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.

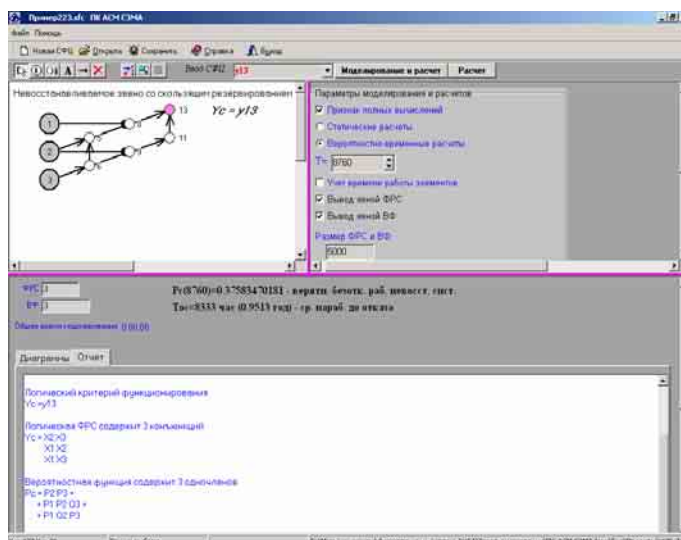


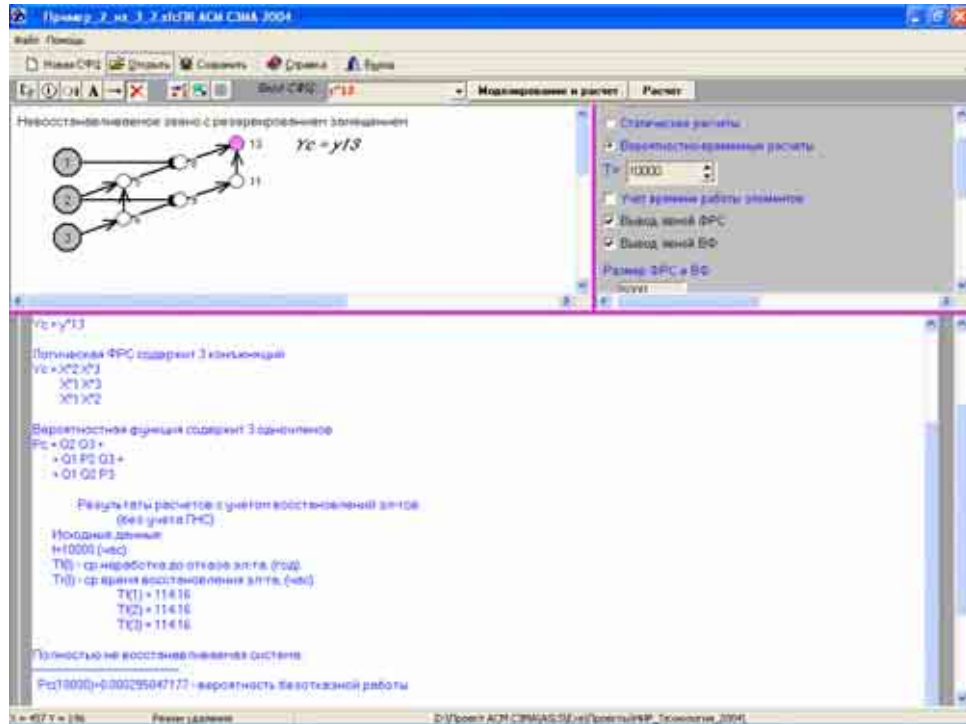
Рис. 2.2.10. Результаты моделирования с помощью ПК АСМ СЗМА

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 невозстановливаемого 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 невозстановливаемых систем с разной степенью нагруженности резерва в ПК Risk Spectrum не выполняются.

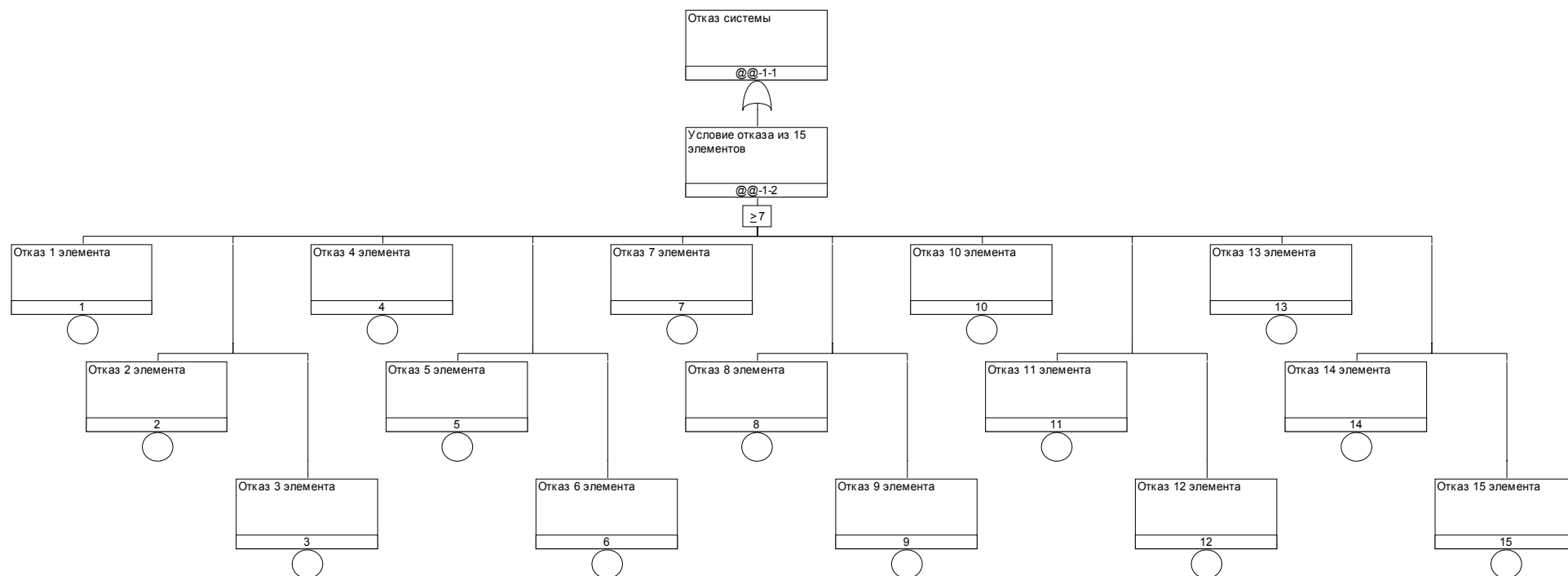


Рисунок 2.2.10. Дерево отказа для системы с мажоритарным резервированием «9 из 15»

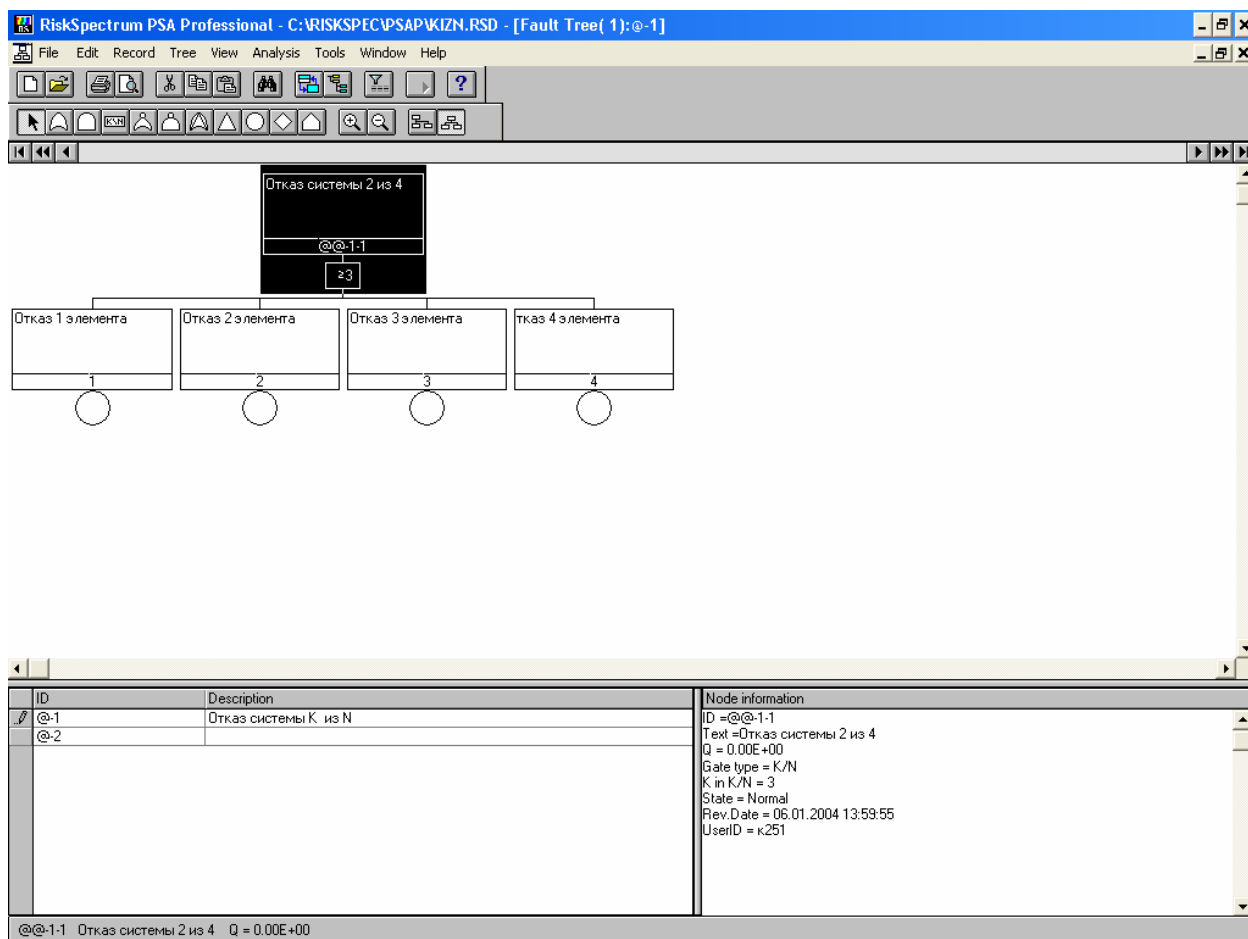


Рис. 2.2.11. Дерево отказов для системы 2 из 4

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	$\xi_i = \mathbf{0.632}$

Таблица 2.2.10.

	$\alpha = 100, \lambda = 10^{-6}$
Вероятность отказа звена на интервале 10 000 ч	2.97E-4
Значимости по Fussell-Vesely	$\xi_i = \mathbf{9.95E-3}$

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.

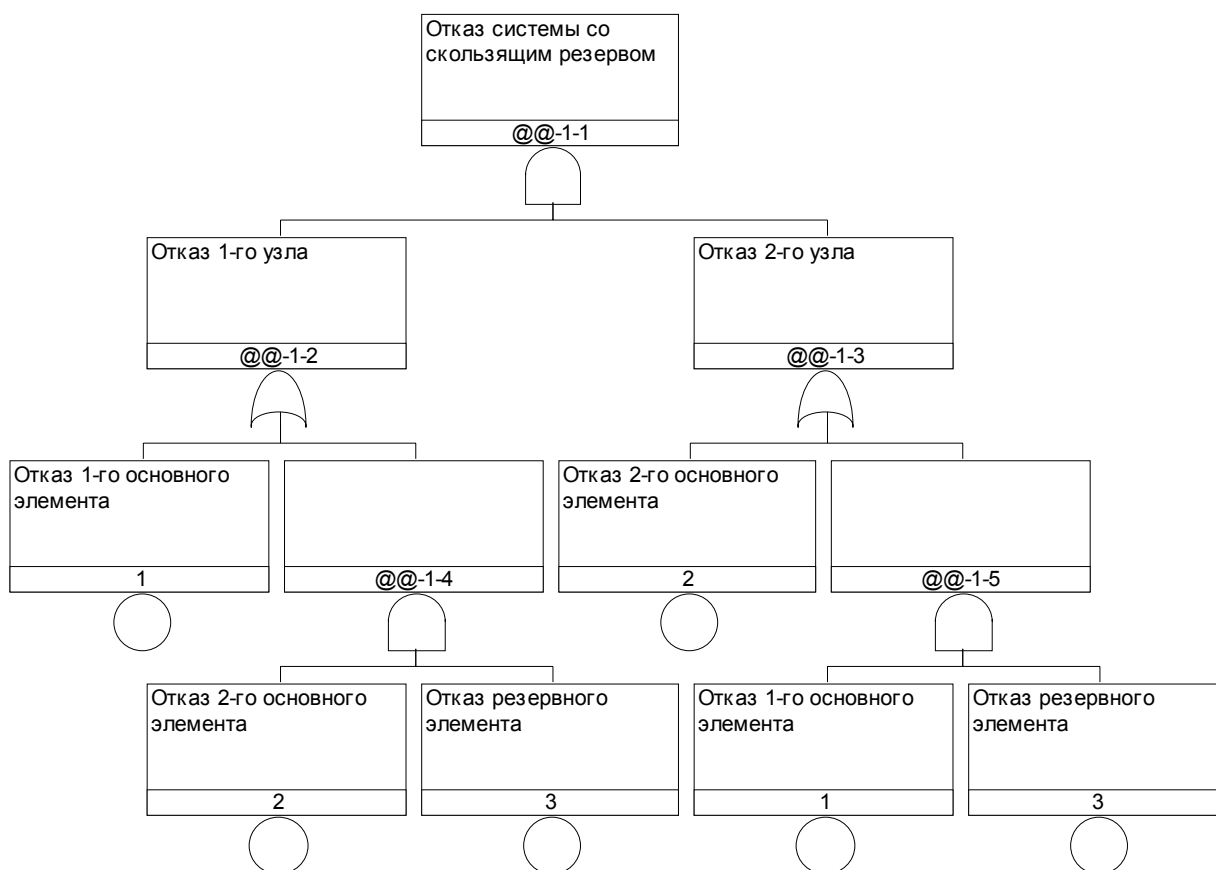


Рис. 2.2.12. Дерево отказов для системы со скользящим резервированием

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	Вклад 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				
			Relax RBD	ПК АСМ	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 невосстанавливаемого 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>	12500 час	$\alpha = 100$	$P_c(13140)$	0.436164	0.43616353	0.2759	
			Toi (час)	13541.7	13541.667	не вычисляется	
		$\alpha = 50$	$P_c(13140)$	0.526078	не вычисляется	не вычисляется	
			Toi (час)	15416.7			
		$\alpha = 20$	$P_c(13140)$	0.595357			
	Toi (час)		17140.1				
	$\alpha = 0$	$P_c(13140)$	0.648983				
		Toi (час)	18750				
	1250000 час	$\alpha = 100$	$Q_c(13140)$	4.538e-6	4.538E-6	4.587E-6	
			Toi (час)	1354166.7	1354166.667	не вычисляется	
<p>Пример 3. Расчет невосстанавливаемого звена со скользящим резервированием с заданной интенсивностью отказов элементов в предположении экспоненциального распределения</p>	$\lambda = 10^{-4}$ 1/ч $t = 8760$ ч.	$\alpha = 100$	$P_c(8760)$	0.375835	0.375835	в ПК Risk Spectrum вычисляются, но результаты не приведены	
			Toi (час)	8333.3	8333.3		
		$\alpha = 20$	$P_c(8760)$	0.452762	не вычисляется	не вычисляется	
			Toi (час)	9547.8	не вычисляется	не вычисляется	
	$\lambda = 10^{-4}$ 1/ч $t = .10000$ ч	$\alpha = 100$	$P_c(10000)$	0.3064	0.3064317	0.7835	
			Toi (час)	8333.3	8333.3	не вычисляется	
		$\alpha = 20$	Значимость элементов	не вычисляется	0.4651	0.632	
			$P_c(10000)$	0.3813	не вычисляется	не вычисляется	
	$\lambda = 10^{-6}$ 1/ч $t = .10000$ ч	$\alpha = 100$	$Q_c(10000)$	2.95e-4	2.95047E-4	2.97E-4	
			Toi (час)	833333	833338.8	не вычисляется	
		$\alpha = 20$	Значимость элементов	не вычисляется	1.97E-2	9.95E-3	
			$Q_c(10000)$	2.17e-4	не вычисляется	не вычисляется	
Toi (час)	954534	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				
	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 используемый 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 невозстанавливаемых 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.