

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АРБИТР В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Нозик А.А., Можяев* А.С., Струков А.В., Гладкова И.А.

Введение

В настоящее время наиболее широкое распространение в отечественной промышленности и за рубежом нашли следующие типовые теории, технологии и программные комплексы (ПК) моделирования и расчета вероятностных показателей надежности и безопасности сложных систем.

1. Технология и ПК, основанные на построении исходных структурных схем свойств систем в форме деревьев отказов (ДО) и деревьев событий (ДС). Известными примерами таких ПК являются: "RISK SPECTRUM" [1], Швеция; "РИСК" [2], "CRISS-5.1", "CRISS-4.0" РФ [3]; "SAPPHIRE" [4], США.

2. Технология и ПК, основанные на построении исходных структурных схем свойств систем в форме деревьев успехов (ДУ). Известным примером такого ПК является "WINDCHILL FTA" (ранее "RELEX FT/ET" [5]), США.

3. В другой версии ПК "WINDCHILL RBD" (ранее "RELEX RBD" [5]) для постановки задач моделирования используется специальная блок-схема (БС) работоспособности (безотказности, безаварийности) исследуемой системы.

4. Отечественный ПК "АРБИТР" (ПК "АСМ СЗМА") [6], основанный на общем логико-вероятностном методе (ОЛВМ) [7, 8] и новой информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ) системного анализа [9].

В данной статье кратко изложены результаты выполненного сравнительного анализа указанных традиционных и новой информационных технологий и соответствующих ПК структурного анализа сложных систем.

I Возможности и ограничения типовых технологий структурного анализа систем

Для практического применения всех, в том числе и указанных, типовых (см. п.1, 2 и 3 Введения) теорий, технологий и ПК пользователю необходимо выполнить следующие основные действия:

1. Детально изучить структуру исследуемой системы и выделить логические условия ее функционирования. В качестве примера на следующем рисунке приведена известная функциональная схема работоспособ-

* ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург, Россия, alexander_mozhaev@szma.com

ности системы электроснабжения (СЭС), разработанная и подробно описанная в трудах основоположников отечественной школы логико-вероятностного моделирования (ЛВМ) Рябина Игоря Алексеевича и Черкесова Геннадия Николаевича [10-12].

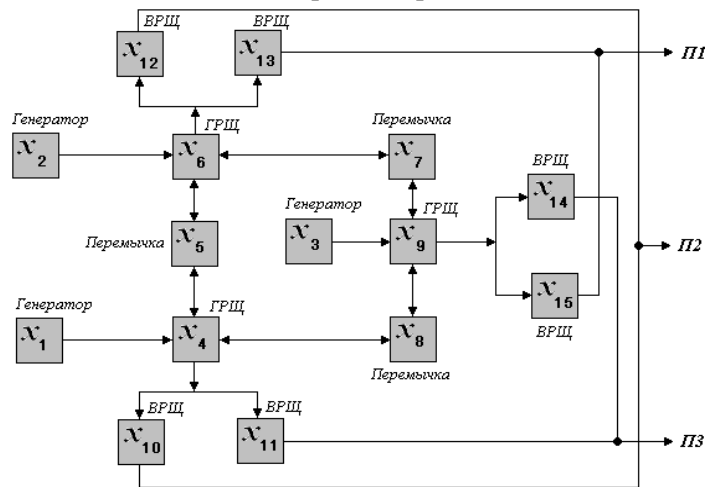


Рис. 1. Функциональная схема системы электроснабжения.

СЭС кольцевой структуры, представленная на рис 1, состоит из 15 элементов:

- 3-х генераторов одинаковой мощности (x_1 , x_2 , x_3);
- 3-х главных распределительных щитов (x_4 , x_6 , x_9);
- 3-х перемычек (x_5 , x_7 , x_8);
- 6-ти вторичных распределительных щитов (x_{10} , x_{11} , x_{12} , x_{13} , x_{14} , x_{15}).

Безотказность (безаварийность) СЭС определяется условием обеспечения питанием всех потребителей П1, П2 и П3 хотя бы от одного генератора x_1 , x_2 или x_3 .

2. На втором этапе необходимо построить структурную схему исследуемой системы в соответствии с возможностями выбранного ПК.

2.1 Для применения теории, технологии и ПК, основанных на ДО [1-4], необходимо на основе полученных (на этапе 1) данных об условиях обеспечения работоспособности (безотказности, безаварийности) системы точно определить все возможные разные комбинации отказов (поражений) отдельных и групп элементов, каждая из которых приводит к отказу (аварии, поражению) моделируемой системы в целом. Затем, на основе этих данных, должна быть построена и введена в компьютер схема ДО в той форме, которая предусмотрена используемым ПК моделирования и расчетов. Для рассматриваемого примера (см. рис.1) минимальное количество разных комбинаций отказов элементов, приводящих к отказу СЭС, составляет 31.

На рис.2 изображена разработанная в НИР [13] схема ДО рассматриваемой СЭС, которая используется в ПК "RISK SPECTRUM" [1].

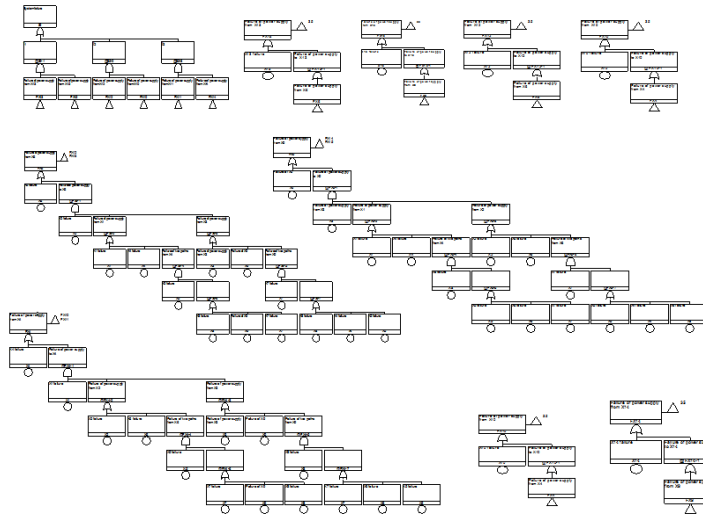


Рис. 2. Дерево отказов СЭС для ПК "RISK SPECTRUM".

2.2 Для применения ПК "WINDCHILL FTA" (ранее "RELEX FT/ET" [5]) и графического аппарата ДУ необходимо, на основе полученных (на этапе 1) данных об условиях работоспособности (безотказности, безаварийности) исследуемой системы, определить все возможные разные комбинации состояний работоспособности отдельных и групп элементов, каждая из которых обеспечивает работоспособность (путь функционирования) исследуемой системы в целом. Затем, на основе этих данных, необходимо построить и ввести в ПК соответствующий граф ДУ. Для рассматриваемого примера (см. рис.1) минимальное количество кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ) исследуемой СЭС (см. рис.1) составляет 92. На рис.3 изображена схема ДУ рассматриваемой СЭС, разработанная в НИР [13], которая используется в ПК "WINDCHILL FTA" [5].

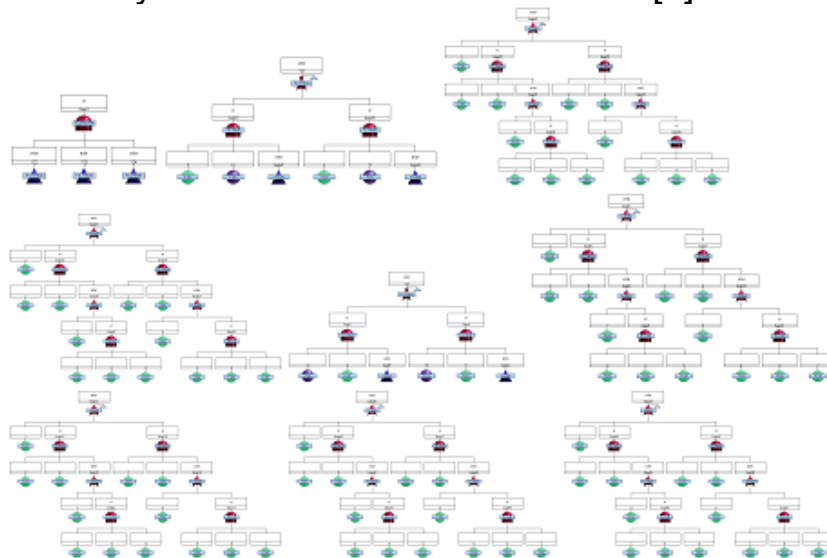


Рис. 3. Дерево успехов СЭС для ПК "WINDCHILL FTA".

2.3 Для применения комплекса "WINDCHILL RBD" (ранее "RELEX RBD" [5]) необходимо, на основе полученных (на этапе 1) данных об условиях функционирования системы, разработать и ввести в ПК специальный граф блок-схемы работоспособности (безотказности, безаварийности) ис-

следуемой системы. Разработанный в [13] граф БС работоспособности рассматриваемого примера СЭС (см. рис.1) для ПК "WINDCHILL RBD" приведен на рис.4.

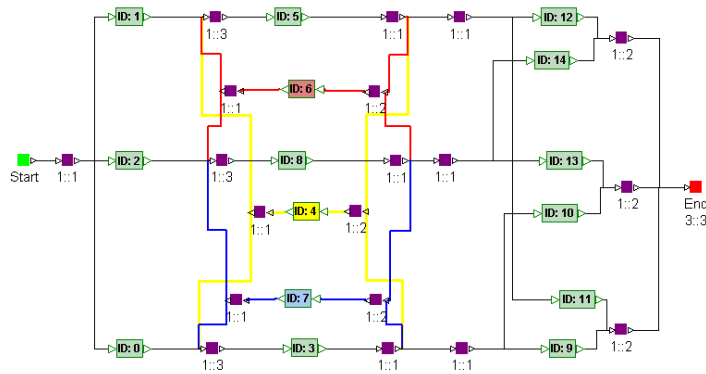


Рис. 4. Блок-схема работоспособности СЭС для ПК "WINDCHILL RBD".

3. На заключительном этапе осуществляется ввод в выбранный ПК соответствующей ему структурной схемы и параметров элементов. Затем осуществляется запуск сеанса автоматизированного моделирования и расчетов вероятностных показателей надежности (безопасности, риска) функционирования исследуемой системы.

В таблице 1 приведены результаты моделирования и расчетов вероятностных показателей надежности (безотказности, отказов) трех примеров анализа СЭС (см. рис.1) разными ПК, полученные в НИР [13].

Таблица 1. Результаты моделирования и расчетов надежности СЭС разными ПК

Примеры	Параметры элементов	Результаты различных ПК			
		RISK SPECTRUM	WINDCHILL	АРБИТР	
1	2	3	4	5	
Пример 1. Расчет надежности СЭС при заданных вероятностях безотказной работы элементов, не зависящих от времени	$p_i = 0.5$	0.005	0.070862	0.07086181641	
	$p_i = 0.99$	0.9879	0.998813	0.998813294911	
	$p_i = 0.999$	0.999988	0.999988	0.99998801303	
Пример 2. Расчет надежности невозстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального закона распределения	$T_{oi} = 2$ г.	Вер. безотк. работы	0.057	0.201540	0.201540416714
	$T_{oi} = 200$ л.		0.9997003	0.9997031	0.999703126904
	$T_{oi} = 2$ г.	Ср. нар. до отк. СЭС час	не вычисляется	5963.74	5963.73
	$T_{oi} = 200$ л.		не вычисляется	596373.3	596373.29
Пример 3. Расчет восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального закона распределения	$T_{oi} = 200$ л. $T_{vi} = 100$ ч. $t = 8760$ л.	Вероятн. отказа СЭС ($t = 8760$ ч.)	7.01E-7	6.85E-6	6.847875E-6
		Коэффициент неготовности СЭС.	3.912E-8	3.9087E-8	3.9087384E-8
		Hazard Rate Интенсивность отказов (1/год)	7.82E-10 [1/час]	6,85E-6	7.0E-6
		Среднее время между отказами (MTBF) (год)	145903. 951	146029.68	146030.21
		Среднее время восст. системы (час).	50	50.0015	50.0015

Результаты расчетов в столбце 3 приведенной таблицы получены с помощью ПК "RISK SPECTRUM" [1] на основе ДО, изображенного на рис.2. Результаты, приведенные в столбце 4, получены с помощью ПК "WINDCHILL FTA" на основе ДУ, изображенного на рис.3, и с помощью ПК "WINDCHILL RBD" на основе БС, изображенной на рис.4. Анализ этих результатов позволил сделать следующие заключения о возможностях и ог-

раничениях практического применения указанных традиционных теорий, технологий и ПК моделирования и расчета вероятностных показателей надежности и безопасности систем:

– Все рассмотренные виды типовых структурных схем свойств систем (см. рис.2, рис.3 и рис.4), применяемые в традиционных технологиях и ПК [1–5], являются специализированными, что не позволяет, например, графическими средствами ПК, использующих ДО, ставить и решать задачи на основе ДУ или БС работоспособности и наоборот.

– Все рассмотренные типовые графические средства исходного структурного моделирования (см. рис.2–4) не являются логически полными, т.е. ограничены возможностью разработки только так называемых монотонных моделей [10, стр.266] исследуемых систем. Это приводит к тому, что с помощью указанных типовых технологий и ПК, основанных только на отдельных ДО, ДУ и БС, невозможно обеспечить совместное решение как прямых, так и обратных задач моделирования и расчета вероятностных показателей надежности и безопасности систем.

– Указанные ограничения также не позволяют традиционными методами и ПК моделировать и рассчитывать показатели технического риска и ожидаемого ущерба [8, пункт 2.8] на основе ДО, ДУ и БС работоспособности систем опасных производственных объектов.

– В указанных ПК реализованы возможности применения лишь одной технологии моделирования – только ДО, только ДС, только ДУ или только БС. Это существенно ограничивает возможности пользователя в выборе и практическом применении наиболее удобного и эффективного подхода к постановке и решению различных классов задач системного анализа.

II Возможности и ограничения ПК "АРБИТР" и технологии АСМ

Некоторые из указанных ограничений традиционных монотонных ЛВМ [10–11], технологий и ПК [1–5] были преодолены в процессе разработки ОЛВМ [7, 8], теории, технологии АСМ [9] и соответствующих ПК [6, 14–16].

В ОЛВМ, технологии и ПК АСМ для структурного представления исследуемых свойств систем используется специальный графический аппарат – схемы функциональной целостности (СФЦ). Основные изобразительные средства и аналитические соотношения аппарата СФЦ приведены на следующем рисунке.

<p>Изобразительные средства СФЦ</p> <p>функциональная вершина \textcircled{i} X_i, P_i</p> <p>фигтивная вершина \textcircled{j} $X_j=I, P_j=1$</p> <p>Конъюнктивные ребра </p> <p>Дизъюнктивные ребра </p>	<p>Входы и выходы вершин СФЦ</p> <p>Дизъюнктивные входы </p> <p>Конъюнктивные входы </p> <p>Прямой выход y_i</p> <p>Инверсный выход \bar{y}_i</p>	<p>Для случая, когда i- функциональная вершина</p> $y_i = x_i \cdot \left(\bigvee_{d \in D} \tilde{y}_d \right) \cdot \left(\bigwedge_{k \in K} \tilde{y}_k \right) \quad \bar{y}_i = \bar{x}_i \vee \left(\bigwedge_{d \in D} \tilde{y}_d \right) \vee \left(\bigvee_{k \in K} \tilde{y}_k \right)$ <p>Для случая, когда i- фиктивная вершина</p> $y_i = \left(\bigvee_{d \in D} \tilde{y}_d \right) \cdot \left(\bigwedge_{k \in K} \tilde{y}_k \right) \quad \bar{y}_i = \left(\bigwedge_{d \in D} \tilde{y}_d \right) \vee \left(\bigvee_{k \in K} \tilde{y}_k \right)$
<p>а) Основные изобразительные средства СФЦ</p>	<p>б) Правила записи систем логических уравнений, эквивалентных СФЦ</p>	

Рис. 5. Графические и аналитические средства аппарата СФЦ ОЛВМ.

Как следует из левой части рис.5, аппарат СФЦ, в сравнении с традиционными средствами монотонного структурного моделирования (см. рис.2 – 4), представляет полный набор логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ". Это впервые позволяет с помощью СФЦ корректно представлять как все традиционные виды монотонных структурных схем (ДО, ДС, ДУ и БС, см. рис.2–4), так и принципиально новый класс немонотонных моделей свойств надежности и безопасности структурно-сложных системных объектов и процессов [9, 14].

Правая часть рис.5 показывает, что логически полный графический аппарат СФЦ корректно представляется системой логических уравнений. Это позволяет с помощью ОЛВМ и соответствующих ПК [6, 14–16] осуществлять построение точных логических и вероятностных математических моделей расчета показателей надежности и безопасности сложных систем. В качестве примера на рис.6.а изображен граф СФЦ, который точно соответствует изображенной на рис.4 блок-схеме работоспособности СЭС, используемой в ПК "WINDCHILL RBD" [5, 13].

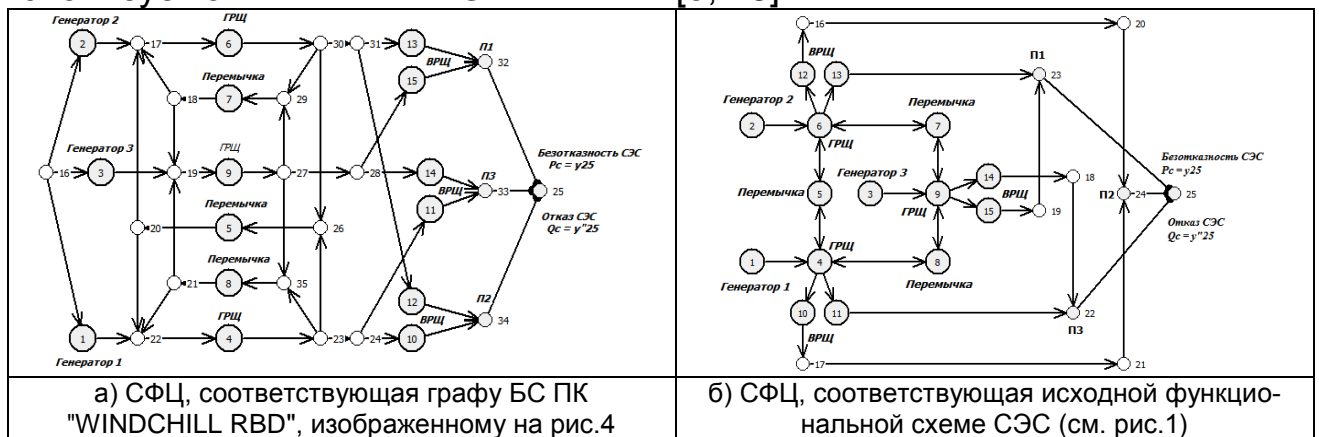


Рис. 6. Варианты СФЦ работоспособности примера СЭС для ПК "АРБИТР".

На рис.6.б приведен другой, циклический вариант графа СФЦ работоспособности рассматриваемого примера СЭС. Этот вариант СФЦ наиболее удобен для построения, поскольку по форме практически совпадает с изображенной на рис.1 исходной функциональной схемой СЭС.

В столбце 5 таблицы 1 приведены результаты моделирования и расчетов показателей надежности (безотказности, отказов) СЭС, полученные с помощью ПК АСМ [6, 14–16] на основе любой из различных вариантов СФЦ, приведенных на рис.6, и СФЦ, эквивалентных схемам на рис.2–4. Все эти результаты совпали с точными расчетами (см. таблица 1 столбец 4), выполненными с помощью ПК "WINDCHILL FTA" на основе ДУ (см. рис.3) и "WINDCHILL RBD" (см. рис.4). Некоторые расхождения результатов, полученных с помощью ПК "WINDCHILL" и "АРБИТР" [6] (см. таблица 1 столбцы 4 и 5), с результатами, приведенными в столбце 3, обусловлены тем, что в ПК "RISK SPECTRUM" [1] реализована технология приближенных вычислений. Следует отметить, что в ПК "АРБИТР" наряду с основными режимами точных расчетов, реализован дополнительный режим приближенных расчетов по методике, эквивалентной ПК "RISK

SPECTRUM". Выполненные в ПК "АРБИТР" приближенные расчеты совпали с данными, приведенными в столбце 3 таблицы 1.

Приведенные результаты подтверждают корректность, структурную и логическую универсальность основанных на ОЛВМ теории, технологии и ПК автоматизированного моделирования и вероятностного анализа структурно-сложных систем. Кроме возможности представления с помощью СФЦ всех видов традиционных структурных схем исследуемых свойств надежности и безопасности систем (ДО, ДС, ДУ и БС), ОЛВМ, технология и ПК АСМ впервые позволяют осуществлять как прямое (например, работоспособность, безотказность), так и обратное (например, неработоспособность, отказ) моделирование систем на основе одних и тех же исходных данных ($p_i = 0.99, i = 1, 2, \dots, 15$) и структурных схем СЭС.

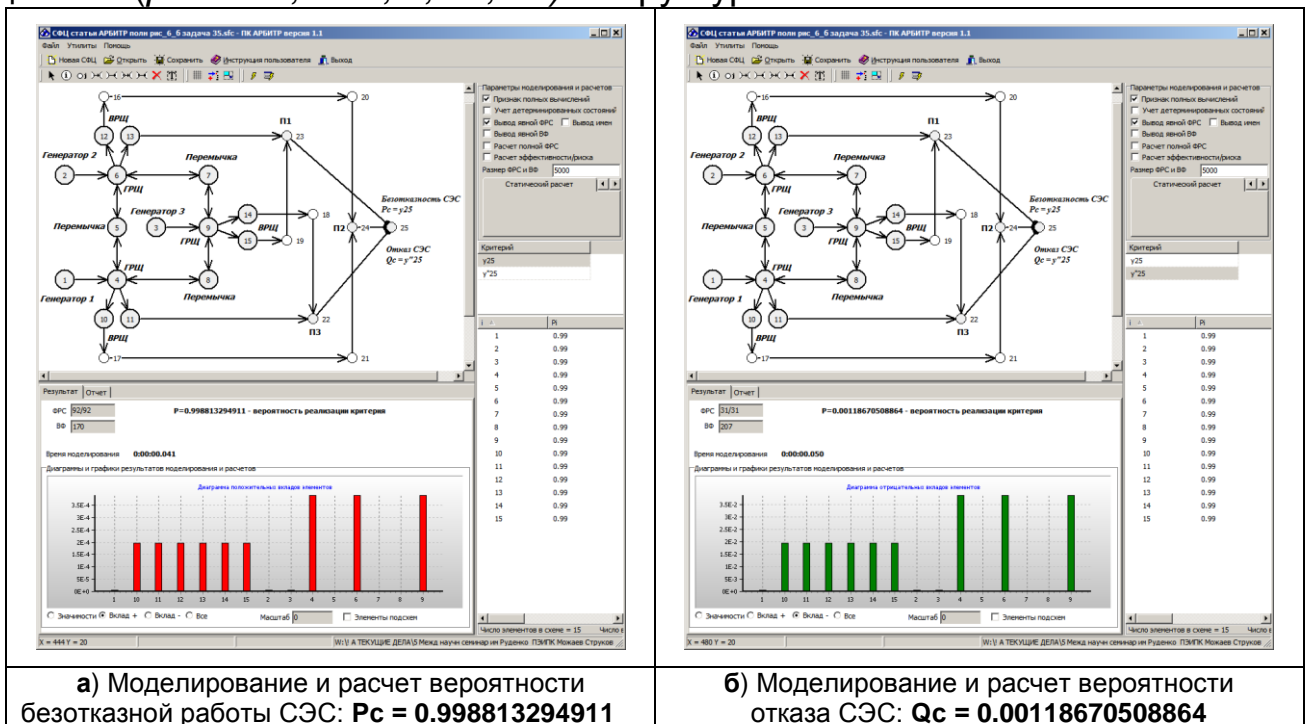


Рис. 7. Решения ПК "АРБИТР" прямой а) и обратной б) задач автоматизированного анализа надежности СЭС.

Для всех логико-вероятностных методов и программных средств важной остается проблема моделирования и расчета вероятностных показателей устойчивости систем большой размерности и высокой структурной сложности. В настоящее время наилучшие результаты в решении этой проблемы получены на основе разработки в ОЛВМ и внедрении в ПК АРБИТР метода одноязычной структурной декомпозиции исходных СФЦ исследуемых систем [7, 8]. Эффективность данного метода иллюстрируется следующим примером.

На рис.8 изображен интерфейс пользователя ПК АРБИТР с результатами решения тестовой задачи [17] большой размерности.

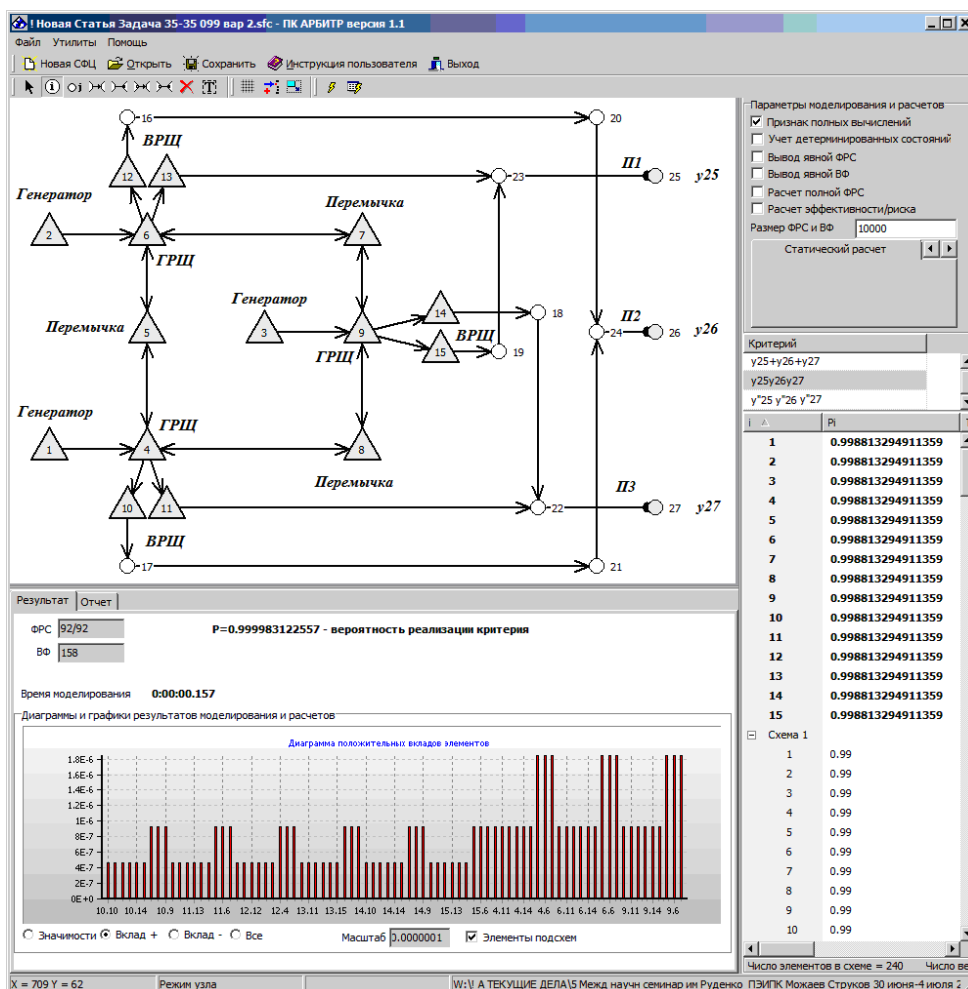


Рис. 8. Результаты решения высокоразмерного варианта задачи анализа надежности СЭС.

Особенность данного высокоразмерного варианта задачи состоит в том, что все 15 элементов рассмотренной ранее СЭС (см. рис.1, рис.6.б и рис.7) на рис.8 обозначены треугольниками. В ПК АРБИТР символ треугольника используется для представления отдельных подсистем, имеющих собственную структуру. В примере на рис.8 каждый треугольник основной СФЦ высокоразмерного варианта СЭС представляет подсистему, имеющую структурную схему работоспособности, аналогичную ранее рассмотренному варианту на рис.6. Таким образом, СФЦ данного варианта высокоразмерной СЭС на рис.8 содержит 225 элементов ($p_i = 0.99, i = 1, 2, \dots, 225$), сгруппированных в 15 подсистем. В табл. 2 приведены результаты решения трех вариантов задачи анализа надежности высокоразмерной СЭС.

Таблица 2. Результаты моделирования и расчета надежности ЭС

ЛКФ	Максимальный размер ФРС	Показатели надежности СЭС
$y_{25} \vee y_{26} \vee y_{27}$	2.6 E+011 КПУФ	PC = 0.99999986648
$\overline{y_{25}} \cdot \overline{y_{26}} \cdot \overline{y_{27}}$	8 621 131 МСО	QC = 0.00000013352
$y_{25} \cdot y_{26} \cdot y_{27}$	3.4941 E+019 КПУФ	PC = 0.999983122557

Во втором столбце таблицы 2 приведены количественные оценки размеров полных логических функций каждой из трех задач (число кратчайших путей успешного функционирования или минимальных сечений отказов). Размеры этих логических функций столь велики (достигают $3.4941 \text{ E}+19$ конъюнкций), что в прямой постановке (без применения односвязной структурной декомпозиции ОЛВМ) ни одна из указанных задач аналитически не может быть решена ни одним из существующих логико-вероятностных методов.

Для решения каждой из указанных задач с помощью ОЛВМ и односвязной структурной декомпозиции комплексу АРБИТР потребовалось менее одной секунды машинного времени.

Литература

1. Risk Spectrum PSA Professional 1.20 // Theory Manual. RELCON AB, 1998. –57р. (Швеция, Available: <http://www.riskspectrum.com>). Вероятностный анализ риска и надежности методом деревьев отказов и деревьев событий. Аттестован Ростехнадзором РФ в 2003 г., аттестационный паспорт № 160.

2. Код "РИСК". Вероятностный анализ риска и надежности методом деревьев отказов и деревьев событий // М.: ОЦПК Минатома России. Аттестован Ростехнадзором РФ в 2004 г., аттестационный паспорт № 172.

3. Бахметьев А.М., Былов И.А., Милакова Ю.В. Отчет о научно-исследовательской работе "Верификация и обоснование программы CRISS 4.0 для моделирования и анализа систем безопасности ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности" // Нижний Новгород : ФГУП ОКБМ им. И.И.Африкантова, 2005. 88 с. Аттестован Ростехнадзором РФ в 2006 г., аттестационный паспорт № 212.

4. Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Version 7.0 (saphire.inel.gov). Reference Manual.

5. Викторова В.С., Кунтшер Х., Петрухин Б.П., Степанянц А.С. Relex – программа анализа надежности, безопасности, рисков // Надежность, 2003. №4(7). –С. 42–64.

6. АРБИТР. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0 // Разработчик и правообладатель: ОАО "СПИК "СЗМА", Санкт-Петербург. Автор Можяев А.С. Свидетельство об официальной регистрации в РОСПАТЕНТ РФ № 2003611101 от 12 мая 2003. – 1 с. Аттестационный паспорт № 222 от 21 февраля 2007 г. Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) РФ. – 6 с.

7. Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности структурно-сложных систем : учебное пособие. Л. : ВМА, 1988. –68 с.

8. Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, безопасности и

риска сложных систем : многотомное издание "Безопасность России". Анализ риска и проблем безопасности. В четырех частях. Часть I. Основы анализа и регулирования безопасности. М.: МГФ "Знание", 2006. –640 с. (С. 153–197). Общий логико-вероятностный метод и технология моделирования безопасности сложных систем : многотомное издание "Безопасность России". Анализ риска и проблем безопасности. В четырех частях. Часть III. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов, 2007. –816 с. (С. 243–293).

9. В.И. Поленин, И.А. Рябинин, С.К. Свирин, И.А. Гладкова. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства : монография. СПб : СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. –410с.

10. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем // 2-е изд. Л. : "Судостроение", 1971. –456 с.

11. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М. : Радио и связь, 1981. –286 с.

12. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Изд. Санкт-Петербургского университета, 2007. –276 с.

13. ФГУП СПБАЭП, ОАО "СПИК СЗМА", (Санкт-Петербург), ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова (г. Москва). НИР "Сравнительный анализ технологий деревьев отказов и автоматизированного структурно-логического моделирования, используемых для выполнения работ по вероятностному анализу безопасности АЭС и АСУТП на стадии проектирования" (шифр "Технология 2004"), 2005. –282 с.

14. Можяев А.С., Гладкова И.А. Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ&ВФ). Свидетельство об официальной регистрации № 2003611100. М. : РОСПАТЕНТ РФ, 12 мая 2003. –1 с.

15. Можяев А.С., Гладкова И.А. "Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем ПК АСМ 2001". Свидетельство об официальной регистрации в РОСПАТЕНТ РФ № 2003611099 от 12 мая 2003. –1 с.

16. Гладкова, И.А. Программный комплекс автоматизированного логико-вероятностного и логико-детерминированного моделирования структурно-сложных систем (ПК АСМ 2011). СПб., 2011 // Разработан на основе ПК АСМ 2001 : Свидетельство об официальной регистрации в РОСПАТЕНТ РФ № 2003611099 от 12 мая 2003, –1 с.

17. Можяев А.С., Киселев А.В., Струков А.В., Скворцов М.С. Отчет о верификации программного средства "Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем" (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0, "АРБИТР"). Заключительная редакция. СПб. : ОАО "СПИК СЗМА", 2007, –1031 с.