

МОЖАЕВ А.С. , д-р техн. наук, профессор

## ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ, ЭФФЕКТИВНОСТИ И РИСКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ

***Аннотация.** Излагаются теоретические основы, методика и примеры практического применения новой информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ) и расчета показателей свойств устойчивости (надежности, живучести, безопасности), эффективности и риска функционирования сложных систем. Приводятся основные характеристики программного комплекса технологии АСМ - "АРБИТР" (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0) [1, 2], аттестованного в 2007 г. Ростехнадзором РФ для промышленного применения.*

***Summary.** Theoretical basis, technique and sample applications of a new information technology of automated structural-logic simulation (ASLS) and calculation of stability (reliability, survivability, safety), efficiency and risk measures of structurally complex systems functioning are described. Basic specifications of the program complex "ARBITOR", based on ASLS technology (PC ASLS SZMA, base version 1.0) [1, 2], which has been certified in 2007 by Rostechnadzor of the Russian Federation for industrial application are provided.*

Теоретической основой технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ) является общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) системного анализа [3-6], в котором используется новое, логически универсальное графическое средство представления структур исследуемых свойств систем - схема функциональной целостности (СФЦ). Методические положения технологии АСМ основываются на полной автоматизации в программных комплексах [1, 8-11] процессов построения математических моделей и расчетов показателей структурных свойств устойчивости (надежности, стойкости, живучести, безопасности), эффективности и риска функционирования сложных и высокомерных систем опасных производственных объектов (ОПО) и объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

### Исходные положения технологии АСМ

В методическом плане технология АСМ подобна традиционным технологиям применения известных программных комплексов (ПК) "Risk Spectrum" [12], "Relax" [13], "CRISS-4.0" [14] и др. аналогичного назначения. В этих технологиях на начальном этапе пользователь подготавливает и вводит в используемый ПК структурную модель исследуемого свойства устойчивости системы в виде, например, дерева отказов, дерева событий [12-14], блок-схемы работоспособности [13] и задает вероятностные параметры элементов. Затем, с помощью применяемого ПК, выполняется автоматическое построение математических моделей и (на основе этих моделей) производятся расчеты различных показателей исследуемого свойства системы. Полученные результаты используются для выработки и обоснования исследовательских, проектных или эксплуатационных управленческих решений.

В указанных традиционных технологиях логико-вероятностного моделирования (на основе блок-схем работоспособности или деревьев отказов) используется функционально неполный базис логических операций "И" и "ИЛИ" (конъюнкция, дизъюнкция), что позволяет автоматизировать построение только, так называемых, монотонных [15] моделей устойчивости систем.

В ОЛВМ и СФЦ технологии АСМ впервые, на всех этапах моделирования и расчетов, применяется функционально полный базис логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ" (конъюнкция, дизъюнкция и отрицание). Это позволило реализовать в программных комплексах

технологии АСМ [1, 8, 10 и др.] все возможности основного аппарата моделирования алгебры логики и обеспечить автоматическое построение как всех видов традиционных монотонных моделей устойчивости систем, так и принципиально нового класса немонотонных моделей надежности, стойкости, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования различных системных объектов большой размерности и высокой структурной сложности.

В рамках настоящей статьи основные теоретические и методические положения технологии АСМ представляются описаниями содержания основных этапов ОЛВМ, аппарата СФЦ и иллюстрируются простыми примерами моделирования и расчета различных показателей устойчивости, эффективности и риска функционирования систем с помощью программного комплекса АРБИТР [1, 2].

### **Основные этапы общего логико-вероятностного метода**

Общий логико-вероятностный метод [3-7] был разработан в 1979-1985 г.г. в рамках научной школы логико-вероятностных методов системного анализа, создателем и постоянным руководителем которой является выдающийся ученый современности, д.т.н., профессор, лауреат государственной премии СССР, заслуженный работник Высшей школы РФ Игорь Алексеевич РЯБИНИН [15 - 17].

ОЛВМ, как и все известные логико-вероятностные методы системного анализа устойчивости, имеет четыре основных этапа, которые выполняются последовательно.

**1. Формализованная постановка задачи (первичное структурно-логическое моделирование).** Этот начальный этап включает следующие основные действия:

- разработка и ввод в ПК АСМ структурной модели исследуемого свойства устойчивости, эффективности или риска функционирования системы в форме схемы функциональной целостности;
- определение и ввод в ПК АСМ значений вероятностных параметров элементов, например, вероятности безотказной работы или отказа, средней наработки до отказа, среднего времени восстановления, возникновения поражающего фактора, стойкости к поражающему воздействию и т.п.;
- задание и ввод в ПК АСМ одного или нескольких логических критериев функционирования (ЛКФ), определяющих условия реализации исследуемого свойства системы, например, безотказности или отказа, выполнения или невыполнения функции системы с определенным уровнем эффективности, возникновения или невозникновения аварии с определенным уровнем последствий и др.

**2. Построение логической модели устойчивости системы.** Это второй этап ОЛВМ. Логическая модель представляет условия реализации системой заданного критерия (свойства) с помощью минимальной дизъюнктивной нормальной формы булевой функции состояний всех ее элементов. Логическая функция является явной детерминированной моделью исследуемого свойства системы, определяемой на основе СФЦ (системы логических уравнений) и заданного ЛКФ. В технологии деревьев отказов с помощью логических моделей представляются минимальные сечения отказов (МСО), а в технологии блок-схем работоспособности – кратчайшие пути успешного функционирования (КПУФ) исследуемой системы [15-17]. В технологии АСМ логическая полнота ОЛВМ и аппарата СФЦ позволяет с помощью ПК АСМ автоматически определять все виды традиционных монотонных логических функций (МСО, КПУФ), а также строить немонотонные логические модели, представляющие различные неприводимые комбинации КПУФ и МСО [10, 11].

**3. Построение расчетного многочлена вероятностной функции.** Это третий этап ОЛВМ. В большинстве известных ПК, реализующих технологию деревьев отказов, данный этап не выполняется. Расчеты осуществляются приближенными методами на основе логической функции, представляющей МСО [12, 14]. При этом приемлемая точность расчетов обеспечивается только для случаев, когда вероятности отказов всех элементов ис-

следуемых систем не больше 0.01 [12]. В комплексах, реализующих технологию АСМ, обеспечивается автоматическое построение правильных многочленов вероятностных функций [10] при допущениях о независимости в совокупности вероятностных параметров элементов и наличии зависимых событий, представляемых с помощью аналитического аппарата так называемых групп несовместных событий (ГНС) [8].

**4. Вычисление вероятностных показателей исследуемых свойств устойчивости системы.** Это завершающий, четвертый этап ОЛВМ. В программных комплексах, реализующих технологию АСМ, вычисляются показатели надежности и безопасности, соответствующие следующим действующим государственным стандартам и руководящим документам:

- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1989, 24 с.;
- ГОСТ 24.701-86. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1986, 17 с.;
- ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996, 15 с.;
- РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Серия 3. Выпуск 10. М.: Госгортехнадзор России, НТЦ "Промышленная безопасность", 2001, 60 с.;
- ГОСТ Р 51901-2002 (МЭК 60300-3-9:1995). Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002, 22 с.;
- ГОСТ Р 51901.14-2005 (МЭК 61078:1991). Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности. М.: Стандартиформ, 2005, 18 с.;
- ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. М.: Стандартиформ, 2005, 11 с.

Во всех программных комплексах, реализующих технологию АСМ, например, [1, 8], первый этап ОЛВМ обеспечивается сервисными средствами ввода графов СФЦ, параметров элементов, задания режимов и критериев автоматизированного моделирования и расчетов системных характеристик. Все остальные этапы ОЛВМ (построения математических моделей большой размерности и выполнения расчетов) осуществляются автоматически.

### Аппарат схем функциональной целостности ОЛВМ

Для практического применения технологии и программных комплексов АСМ пользователю необходимо освоить методику представления свойств устойчивости, эффективности и риска исследуемых системных объектов с помощью графического аппарата СФЦ ОЛВМ [3-6]. Основные графические символы, используемые в СФЦ, приведены на рис.1.

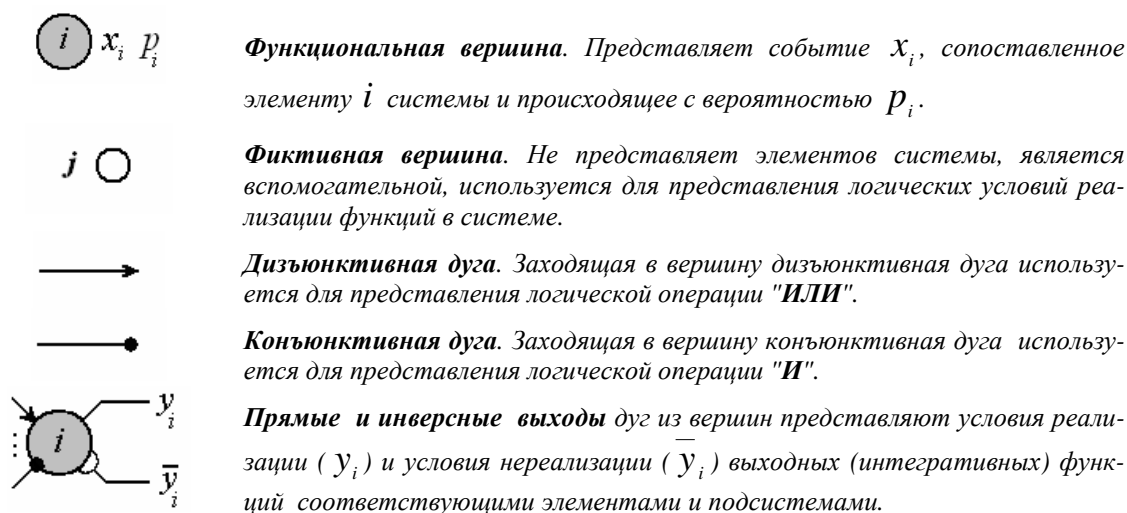


Рис.1. Основные графические символы аппарата схем функциональной целостности

Методика применения аппарата СФЦ для построения структурных моделей свойств устойчивости систем подробно описана и проиллюстрирована примерами в [2-7] и научно-исследовательской работе [18]. Эта методика подобна известным методикам построения блок-схем, графов связности с циклами, деревьев отказов и деревьев событий. Однако имеют место ряд особенностей аппарата СФЦ, которые следует учитывать при построении структурных моделей различных свойств системной устойчивости, эффективности и риска. Они заключаются в следующем:

- При построении СФЦ применяется так называемый событийно-логический подход [4 -7]. Этот подход включает в себя анализ исследуемого системного объекта и выделение конечного числа бинарных случайных событий  $x_i$ , элементов  $i = 1, 2, \dots, N$  системы, которые, по мнению разработчика, являются существенными и позволяют с достаточной точностью представить графом СФЦ исследуемые системные свойства. Затем устанавливаются логические связи  $\tilde{y}_i = \{y_i, \bar{y}_i\}$  реализации или не реализации выходных функций всеми выделенными элементами. В совокупности они позволяют графическими средствами СФЦ (см. рис.1) строго и логически точно представить все существенные условия реализации (или нереализации) моделируемого свойства рассматриваемого системного объекта в целом. На рис.2 изображен обобщенный фрагмент СФЦ и соответствующие ему базовые логические уравнения для прямого и инверсного выходов вершины  $i$ .

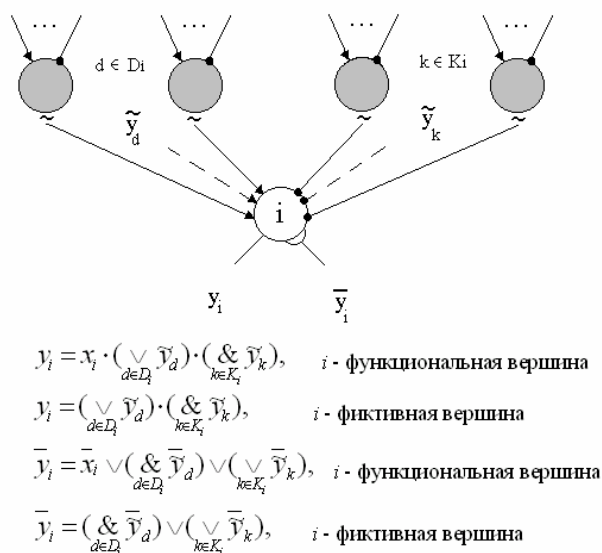


Рис.2. Обобщенный фрагмент СФЦ и базовые логические уравнения

- С помощью функциональных вершин  $i$  (см. рис.1 и рис.2) в разрабатываемой СФЦ могут представляться как исходы события безотказной (безаварийной) работы, так и исходы событий отказов (аварий) соответствующих элементов исследуемой системы. Аналогичное смысловое значение приобретают логические  $x_i$  переменные и вероятностные  $p_i$  характеристики, сопоставляемые выделенным элементам системы. Далее эти логические переменные и вероятностные характеристики используются при автоматическом построении логических и вероятностных математических моделях устойчивости исследуемой системы в целом;
- С помощью логических связей (дизъюнктивных и конъюнктивных дуг, см. рис.1 и рис.2) в СФЦ графически представляются условий реализации  $y_i$  или нереализации  $\bar{y}_i$  выходных (интегративных) функций всеми элементами  $i$  и подсистемами исследуемого объекта в целом;

- Наличие в аппарате СФЦ двух видов исходящих из функциональных и фиктивных вершин дуг позволяет представлять монотонные и немонотонные логические условия реализации (прямой выход  $y_i$ ), и нереализации (инверсный выход  $\bar{y}_i$ ) соответствующих выходных функций элементами и подсистемами и исследуемого объекта;
- Заходящие в функциональную или фиктивную вершину  $i$  дизъюнктивные  $\tilde{y}_d = \{y_d, \bar{y}_d\}$  и конъюнктивные  $\tilde{y}_k = \{y_k, \bar{y}_k\}$  дуги (см. рис.2) используются для представления логических условий реализации прямой выходной функции  $y_i$  этого элемента системы. Приведенные на рис.2 уравнения для  $y_i$  определяют логические условия реализации, а для  $\bar{y}_i$  - условия нереализации соответствующей выходной функции каждого элемента  $i$  исследуемой системы

Из сказанного следует, что каждая разработанная СФЦ является неявной, но математически строгой (система логических уравнений) детерминированной моделью исследуемых свойств системы. Графическая форма СФЦ удобна для пользователя на этапе формализованной постановки задачи. Математически строгое соответствие СФЦ системе логических уравнений (см. рис.2) обеспечивает возможность полной автоматизации всех последующих этапов моделирования и расчетов показателей устойчивости исследуемых системных объектов большой размерности и высокой структурной сложности.

ОЛВМ, технология и ПК АСМ позволяют пользователю применять (по своему выбору) три подхода к постановке задач анализа свойств устойчивости, эффективности и риска функционирования сложных систем.

1. Традиционный **прямой подход**, в результате которого пользователь разрабатывает СФЦ работоспособности (безотказности, готовности, невозникновения аварии и т.п.) исследуемой системы. При этом допускается неограниченное представление в СФЦ циклических (мостиковых) связей, существующих в системе. При использовании прямого подхода пользователь, на основе анализа исходной функциональной схемы работоспособности системы, должен определить и представить графическими средствами СФЦ все условия безотказной работы элементов исследуемой системы. Так например, на рис.3.а изображена исходная функциональная схема системы электроснабжения (СЭС) известной задачи №35 И.А.Рябина [15], в которой имеются множественные кольцевые циклические связи обеспечения работоспособности элементов 4-8. Разработанная на основе функциональной схемы СФЦ безотказности СЭС изображена на рис.3.в. [2, 18].

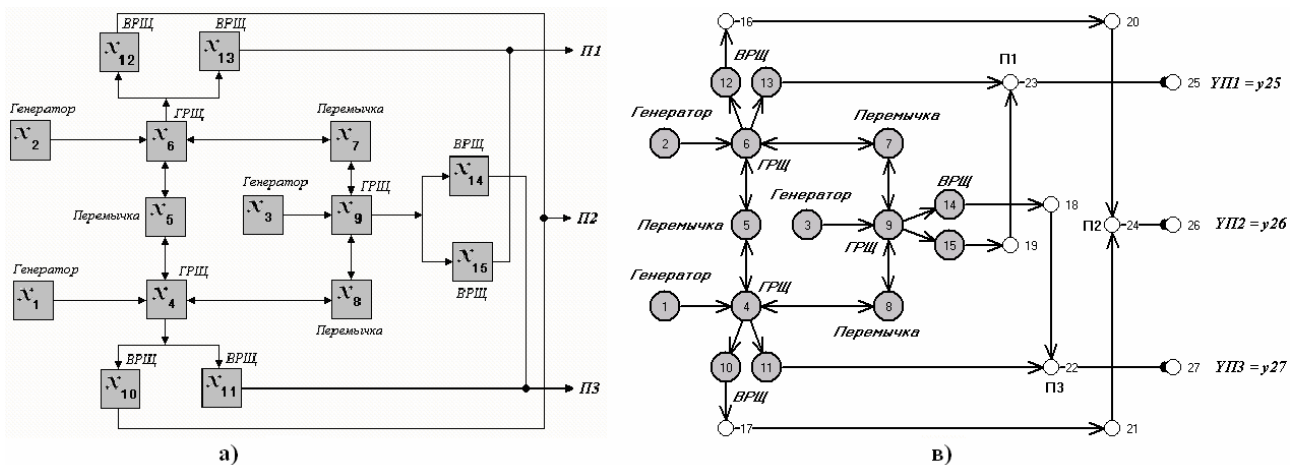


Рис.3. Исходная функциональная схема и СФЦ безотказности СЭС

Не трудно видеть, что, в данном случае, разработка СФЦ безотказности не представляет большой сложности, так как она подобна исходной функциональной схеме СЭС.

- Традиционный **обратный подход**, в результате применения которого разрабатывается СФЦ дерева отказов исследуемой системы. При использовании обратного подхода пользователь, на основе анализа исходной функциональной схемы работоспособности системы, должен определить и представить графическими средствами СФЦ все логические условия возникновения отказа исследуемой системы. На рис.4 изображена СФЦ дерева отказов, разработанная специалистами СПбАЭП [18], на основе функциональной схемы работоспособности СЭС (см. рис.3.а).

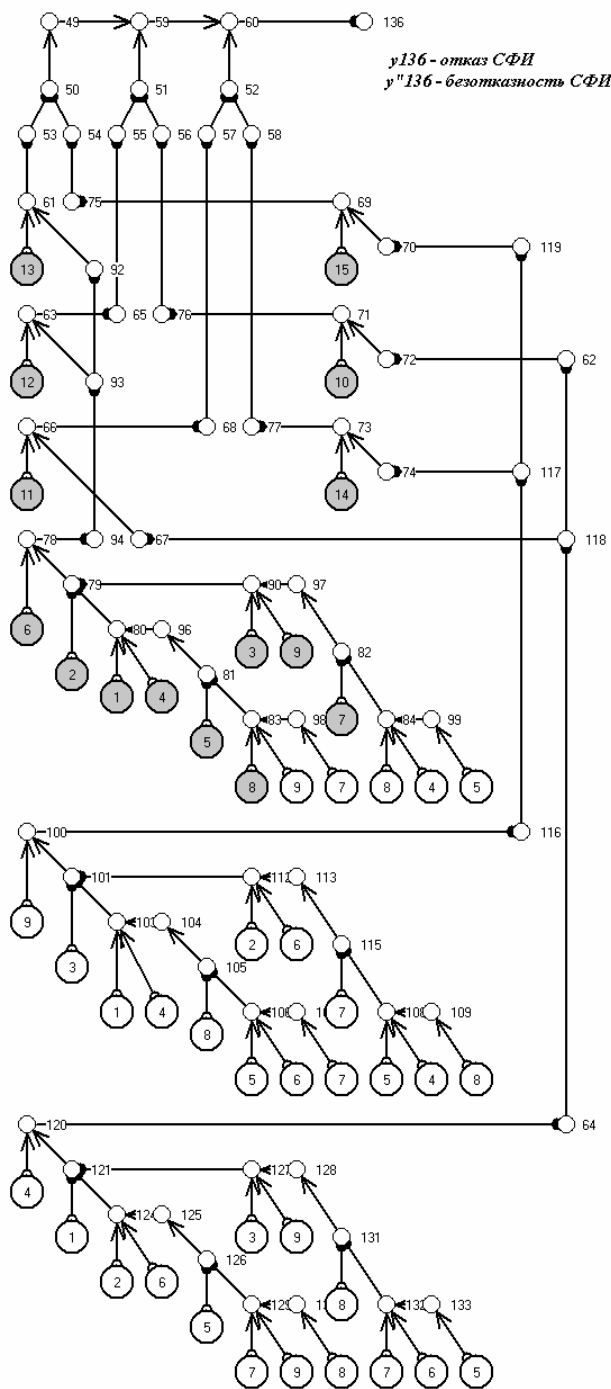


Рис.4. СФЦ дерева отказов СЭС

Не трудно видеть, что в данном случае разработка правильного дерева отказов СФИ оказалась более трудной задачей, с которой постоянной сталкиваются специалисты, использующие технологию и программные комплексы деревьев отказов. Но поскольку технология АСМ позволяет использовать обе указанные технологии (блок-схем работоспособности и деревьев отказов), пользователю предоставляется право выбора прямого или обратного подходов для разработки структурной модели исследуемого свойства системы. При правильном построении СФЦ в виде блок-схемы или дерева отказов, следующие результаты автоматизированного моделирования и расчетов будут одинаковыми. В рассмотренном примере, при анализе надежности СЭС с помощью комплекса АРБИТР, как на основе СФЦ блок-схемы работоспособности (см. рис.3.а), так и на основе СФЦ дерева отказов (см. рис.4) получены результаты, приведенные в табл.1 [2, 18].

Таблица 1. Результаты вероятностного анализа надежности СЭС  
Средняя наработка до отказа элементов:  $T_{O_i} = 200 \text{ лет}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 15$ ;  
Заданная наработка системы:  $t = 8760 \text{ час}$ . (1 год).

№	Исследуемое свойство СЭС и логический критерий его реализации	Число КПУФ или МСО логической функции	Число одночленов вероятностной функции	Вероятность события
1	<b>Безотказность по СФЦ на рис.3.а</b> $Y_{25} \cdot Y_{26} \cdot Y_{27}$	<b>92</b> (КПУФ)	<b>9</b>	$P_{СЭС}(8760ч) = 0.999703126904$
2	<b>Отказ по СФЦ на рис.3.а</b> $Y_{25} \vee Y_{26} \vee Y_{27}$	<b>31</b> (МСО)	<b>190</b>	$Q_{СЭС}(8760ч) = 0.000296873096216$
3	<b>Безотказность по СФЦ на рис.4</b> $Y_{136}$	<b>92</b> (КПУФ)	<b>356</b>	$P_{СЭС}(8760ч) = 0.999703126904$
4	<b>Отказ по СФЦ на рис.4</b> $Y_{136}$	<b>31</b> (МСО)	<b>201</b>	$Q_{СЭС}(8760ч) = 0.000296873096216$
5	<b>Средняя наработка до отказа СЭС</b>			$T_{O_{СЭС}} = 596373 \text{ час}$ (68.08 год)

Результаты, приведенные в табл.1 показывают, что независимо от того прямой или обратный подходы используются при постановке задачи анализа надежности СЭС, с помощью АРБИТР могут автоматически определяться (с одинаковой точностью) и кратчайшие пути успешного функционирования (КПУФ), и минимальные сечения отказов (МСО). Правильность полученных результатов автоматизированного моделирования и расчетов подтверждена сравнением с аналитическими решениями этой задачи [15] и результатами, полученными с помощью комплексов Relex и Risk Spectrum [2, 18].

- Комбинированный (смешанный) подход, в результате применения которого пользователю представляется возможность строить новый класс немонотонных структурных моделей свойств надежности, живучести, безопасности и риска функционирования сложных объектов. Поскольку это во многом новый и еще не освоенный широким кругом специалистов подход к структурной постановке задач анализа систем в технологии АСМ, в следующем разделе данной статьи он иллюстрируется взаимосвязанным комплексом задач структурной постановки и расчета показателей устойчивости, эффективности и риска функционирования простейшей системы, состоящей всего из двух дублированных элементов.

Как показала многолетняя практика применения ОЛВМ в технологии АСМ и подтвердили результаты аттестации комплекса АРБИТР [2], логическая полнота аппарата СФЦ позволяет с его помощью корректно представлять все типовые виды монотонных структурных схем устойчивости систем (блок-схемы, графы связности, деревья отказов, деревья событий), а также новый класс немонотонных структурных моделей устойчивости, эффективности и риска функционирования сложных систем. Поэтому в технологии АСМ можно без ограничений применять все три варианта подходов к структурной постановке задач автоматизированного моделирования и расчета показателей различных свойств устойчивости, эффективности и риска функционирования сложных систем.

### Тестовые примеры применения технологии АСМ

Возможно, что следующие примеры могут показаться излишне простыми. Но главная цель их рассмотрения заключается в начальном освоении заинтересованным читателем новых возможностей постановки и решения, на единой теоретической и методической базе ОЛВМ, СФЦ, технологии и ПК АСМ, различных задач моделирования и количественной оценки свойств надежности (безотказности), стойкости, живучести, комплексной устойчивости, эффективности, технического риска и ожидаемого ущерба функционирования систем.

Исходная функциональная схема (блок-схема) работоспособности рассматриваемой двухэлементной дублированной системы приведена на рис.5.

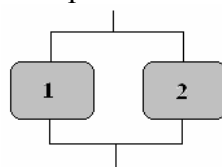


Рис.5. Функциональная схема работоспособности дублированной системы из двух элементов

По каждому из указанных выше свойств устойчивости, эффективности и риска функционирования данной двухэлементной системы, далее приводятся результаты построения СФЦ и автоматизированного моделирования и расчетов показателей, полученные с помощью комплексов АРБИТР [1] и ПК АСМ 2001 [8, 9]. Эти результаты несложно проверить путем ручного аналитического решения соответствующих задач.

**Модель надежности (безотказности) системы.** Под надежностью (*безотказностью*) понимается способность системы сохранять (или не сохранять) работоспособность при случайных реализациях элементарных событий возникновения отказов и восстановления ее элементов в нормальных (заданных) условиях эксплуатации (определение не противоречит ГОСТ 27.002-89).

На первом этапе технологии АСМ строится СФЦ надежности (безотказности) рассматриваемой двухэлементной системы. Применяя событийно-логический подход к анализу функциональной схемы системы (см. рис.5) и графический аппарат СФЦ (см. рис.1), выделяем два случайных события  $x_1$ ,  $x_2$  безотказной работы (или готовности) элементов. В разрабатываемой СФЦ на рис.6 они представлены двумя функциональными вершинами с номерами 1 и 2 соответственно.

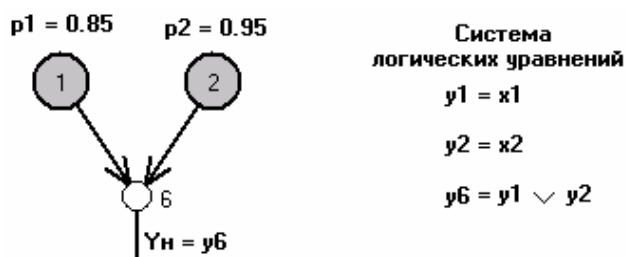


Рис.6. СФЦ надежности системы



Положим, что параметры надежности (безотказности, готовности) элементов составляют  $p_1 = 0.85$  и  $p_2 = 0.95$ . Исходящие из функциональных вершин дуги  $y_1$ ,  $y_2$  представляют на графе СФЦ логические условия реализации каждым элементом своих функций в системе. Заходящие в фиктивную вершину 6 дизъюнктивные дуги  $y_1$ ,  $y_2$  (операция "ИЛИ", см. рис.1 и рис.2) представляют условие  $y_6 = y_1 \vee y_2$ , которое является логическим критерием  $Y_H = y_6$  надежности (безотказности, готовности) рассматриваемой системы в целом.

На рис.6 справа приведены логические уравнения для выходов всех трех вершин построенной СФЦ, которые всегда могут быть записаны на основе базовых логических соотношений, приведенных на рис.2. Эта система уравнений является точным аналитическим (логическим) аналогом разработанной СФЦ надежности системы. В программных комплексах технологии АСМ системы логических уравнений формируются автоматически (в процессе ввода графа СФЦ) и далее используются для автоматического логического моделирования.

На втором этапе ОЛВМ, на основе разработанной СФЦ и заданного логического критерия, программный комплекс АРБИТР автоматически решает соответствующую систему логических уравнений (см. рис.6) и определяет логическую функцию надежности системы

$$Y_H = y_1 \vee y_2 = x_1 \vee x_2.$$

Далее, на третьем этапе ОЛВМ, ПК АРБИТР автоматически преобразует полученную логическую функцию в правильный многочлен расчетной вероятностной функции (для гипотезы о независимости событий  $x_1$  и  $x_2$ )

$$P_H = p_1 + q_1 p_2, \text{ где } q_1 = 1 - p_1.$$

На завершающем четвертом этапе ОЛВМ комплекс АРБИТР выполняет (используя многочлен вероятностной функции) точный расчет искомой вероятностной характеристики надежности системы – вероятности безотказной работы

$$P_H = 0.85 + 0.15 \times 0.95 = 0.9925.$$

**Модель стойкости (условной живучести) системы.** Под структурной *стойкостью* (условной живучестью) [7] будем пониматься способность системы сохранять (или не сохранять) работоспособность при случайных поражениях (или непоражениях) ее элементов вследствие воздействия достоверно возникающих поражающих факторов определенного вида (ударов, взрывов, пожаров и т.п.). Здесь условность живучести определяется достоверностью возникновения поражающих факторов, а надежность элементов считается абсолютной.

На первом этапе, для построения СФЦ стойкости рассматриваемой системы, вводятся два новых элементарных случайных события  $x_3$  и  $x_4$  независимого поражения элементов 1 и 2 системы достоверным поражающим фактором (см. рис.7).

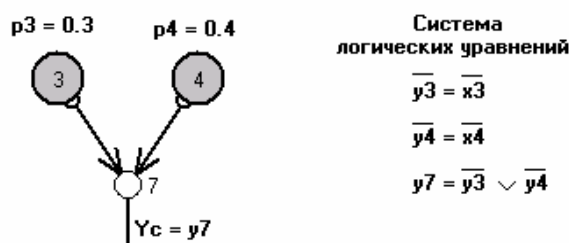


Рис.7. СФЦ стойкости системы

В СФЦ стойкости случайные события поражения элементов 1 и 2 представляются соответствующими функциональными вершинами 3 и 4. Тогда условиями непоражения (стойкости) элементов 1 и 2 (сохранения их работоспособности) становятся инверсные выходные дуги  $\overline{y_3}$ ,  $\overline{y_4}$  из указанных вершин. На выходе фиктивной вершины 7 представлено условие

$y_7 = \overline{y_3} \vee \overline{y_4}$ , которое является логическим критерием  $Y_C = y_7$  стойкости исследуемой системы в целом. Положим, что поражения элементов 1 и 2 воздействием достоверно возникающего поражающего фактора происходят независимо с вероятностями  $p_3 = 0.3$ ,  $p_4 = 0.4$  соответственно. Надежность элементов исследуемой системы считается абсолютной.

Результаты следующих этапов автоматического построения комплексом АРБИТР логической и вероятностной математических моделей и расчета вероятности непоражения системы достоверно возникающим поражающим фактором (ее стойкости, условной живучести) составляют:

$$Y_C = y_7 = \overline{y_3} \vee \overline{y_4} = \overline{x_3} \vee \overline{x_4} - \text{логическая функция стойкости системы};$$

$$P_C = q_3 + p_3q_4 - \text{многочлен расчетной вероятностной функции стойкости системы}$$

(здесь  $q_3 = 1 - p_3$ ,  $q_4 = 1 - p_4$  - параметры стойкости элементов);

$$P_C = 0.88 - \text{вероятностный показатель стойкости исследуемой системы.}$$

В последние годы все большее внимание начинает уделяться вопросам детерминированного анализа условной живучести (стойкости) сложных систем. Программные средства детерминированного анализа живучести должны точно и однозначно показывать, какие из всего множества функций системы прекратят работать и какие функции сохраняться после достоверного поражения различных заданных групп элементов системы. В настоящее время АРБИТР позволяет решать задачи детерминированного анализа стойкости (условной живучести) систем большой размерности и высокой структурной сложности с корректным учетом неограниченного количества циклических (мостиковых) связей, размноженных вершин и групп несовместных событий.

**Модель живучести системы.** Под структурной живучестью (полной, безусловной живучестью) [7] будем понимать способность системы сохранять (или не сохранять) работоспособность при случайных поражениях (непоражениях) ее элементов вследствие случайного (недостоверного) возникновения поражающих факторов (ударов, взрывов, пожаров и т.п.). При этом надежность элементов системы считается абсолютной.

Для учета в структурной модели живучести рассматриваемой двухэлементной системы случайности возникновения поражающего фактора, в разрабатываемую СФЦ вводится еще одно новое событие  $x_5$  - возникновение поражающего фактора. Свершение этого события является обязательным условием последующего воздействия и возможного (случайного) поражения (или непоражения) элементов 1 и/или 2 системы. Если поражающий фактор не возникает, то элементы 1 и 2 непоражаются достоверно.

Путем дополнения ранее разработанной СФЦ стойкости (см. рис. 5) функциональной вершиной 5 (возникновение поражающего фактора) и указанием на графе дугами  $y_5$  условий обеспечения событий  $x_3$ ,  $x_4$  (поражения элементов 1 и 2), строится СФЦ полной живучести рассматриваемой системы (см. рис.8).

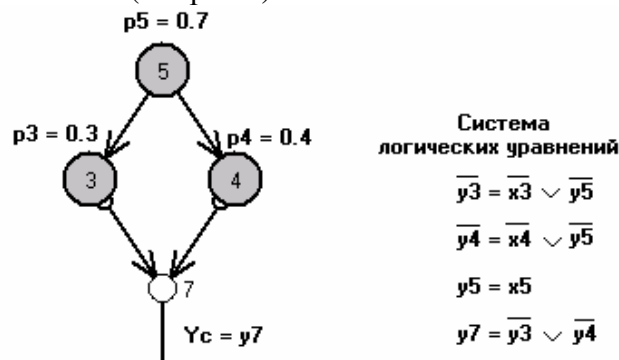


Рис.8. СФЦ живучести системы

Здесь на выходе фиктивной вершины 7 (как и в предыдущем примере) представлено условие  $y_7 = \overline{y_3} \vee \overline{y_4}$  сохранения работоспособности хотя бы одним элементом, которое теперь является критерием  $Y_{ж} = y_7$  живучести системы при случайном возникновении и воздействии поражающего фактора. Положим, что возникновение поражающего фактора происходит с вероятностью  $p_5 = 0.7$ . Вероятности  $p_3 = 0.3$ ,  $p_4 = 0.4$  являются ранее заданными параметрами нестойкости (поражения) элементов 1 и 2 при возникновении поражающего фактора.

Результаты следующих этапов моделирования и расчета живучести системы, автоматически полученные с помощью ПК АРБИТР, составляют:

$Y_{ж} = y_7 = \overline{y_3} \vee \overline{y_4} = \overline{x_4} \vee \overline{x_5} \vee \overline{x_3}$  - логическая функция стойкости системы;

$P_{ж} = q_4 + p_4 q_5 + q_3 p_4 p_5$  - многочлен вероятностной функции живучести

( $q_3 = 1 - p_3$ ,  $q_4 = 1 - p_4$  - параметры стойкости элементов);

$P_{ж} = 0.916$  - вероятностный показатель живучести исследуемой системы.

Следует отметить, что разработанная СФЦ полной живучести рассматриваемой двухэлементной системы (см. рис.8), является немонотонной по построению. Это означает, в частности, что ни с помощью типовых блок-схем, ни с помощью типовых деревьев отказов аналогичная структурная модель полной живучести не может быть построена. Вместе с тем, полученные логическая и вероятностная функции живучести еще остаются монотонными, в рамках принятых содержательных определений используемых элементарных событий.

**Модель устойчивости системы.** Под структурной устойчивостью будем понимать комплексную характеристику способности системы сохранять (или не сохранять) работоспособность, определяемую различными совместными комбинациями свойств ее структурной надежности, стойкости и живучести.

Объединяя ранее разработанные СФЦ (см. рис.6, рис.7 и рис. 8), строим структурную модель комплексной устойчивости рассматриваемой двухэлементной системы в целом (см. рис.9).

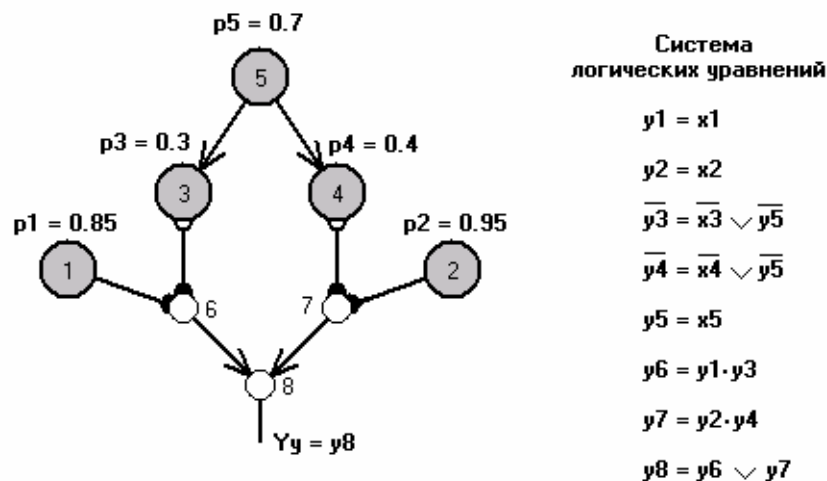


Рис.9. СФЦ устойчивости системы

Здесь на выходе фиктивной вершины 6 представлено условие  $y_6 = y_1 \cdot \overline{y_3}$  сохранения работоспособности (и неотказа, и непоражения) элемента 1. На выходе фиктивной вершины 7 представлено аналогичное условие сохранения работоспособности для элемента 2 исследуемой системы. На выходе фиктивной вершины 8 представлено условие  $y_8 = y_6 \vee y_7$  сохранения работоспособности хотя бы одним элементом, которое является логическим критерием

рием  $Y_v = y_8$  комплексной устойчивости рассматриваемой системы в целом. Остальные фрагменты данной СФЦ были рассмотрены в предыдущих примерах. Все заданные вероятностные параметры элементов остались прежними.

Результаты последующих этапов автоматизированного моделирования и расчета устойчивости системы, полученные с помощью ПК АРБИТР, составляют:

$Y_v = \overline{x_5} \cdot x_2 \vee \overline{x_4} \cdot x_2 \vee \overline{x_5} \cdot x_1 \vee \overline{x_3} \cdot x_1$  - логическая функция устойчивости системы;

$P_v = q_4 p_5 p_2 + q_3 p_5 p_1 + q_5 p_2 + q_5 p_1 q_2 - 3q_4 p_5 p_2$  - многочлен расчетной вероятностной функции;

$P_v = 0.875845$  - вероятностный показатель устойчивости исследуемой системы.

Следует отметить, что разработанная СФЦ комплексной устойчивости (см. рис.8) рассматриваемой двухэлементной системы (см. рис.5), а также ее логическая и вероятностная функции является немонотонными. Это означает, в частности, что с помощью типовых блок-схем или деревьев отказов аналогичная структурная модель устойчивости не может быть построена. Конъюнкции логической функции уже не представляют ни классические КПУФ ни классические МСО системы, а образуют их немонотонные комбинации. Немонотонность полученного многочлена вероятностной функции проявляется, в частности, в том, что увеличение вероятностей одних элементарных событий (например  $p_1, p_2$ ) приводит к увеличению значения  $P_v$ , а других событий (например,  $p_3, p_4, p_5$ ) приводит к уменьшению значения этого показателя.

**Модель реальной эффективности системы.** В ГОСТ 27.003-90 и ГОСТ 27.301 [18] введено понятие "изделие вида II", которое может находиться в некотором числе  $j=1,2,\dots,M$  частично неработоспособных состояний (состояний частичного отказа и/или поражения)  $Y_j$ . Каждое  $Y_j, j=1,2,\dots,M$  характеризуется соответствующим значением  $E_j$  условной (идеальной) эффективности функционирования системы в этих состояниях. Будем такие системы называть качественно сложными. Тогда под *реальной эффективностью*  $W$  качественно сложной системы понимается математическое ожидание значения показателя эффективности ее функционирования при случайном нахождении (по причинам неабсолютной устойчивости) в состояниях  $Y_j$  полной и частичной работоспособности.

Для ранее рассмотренного примера устойчивости двухэлементной системы (см. рис.9) положим, что общее условие ее работоспособности  $y_8 = y_6 \vee y_7$  характеризуется тремя качественно различными несовместными областями состояний:

1.  $Y_1 = y_6 \cdot y_7$  состояния полной работоспособности, эффективность системы  $E_1 = 100\%$  ;
2.  $Y_2 = y_6 \cdot \overline{y_7}$  состояния частичной работоспособности, эффективность системы  $E_2 = 70\%$  ;
3.  $Y_3 = \overline{y_6} \cdot y_7$  состояния частичной работоспособности, эффективность системы  $E_3 = 30\%$  .

Для удобства представления условий реализации состояний  $Y_j, j=1,2,3$  разных уровней условной эффективности системы, в разрабатываемую СФЦ реальной эффективности вводятся три фиктивные вершины с номерами 100, 70 и 30 соответственно (см. рис.10).

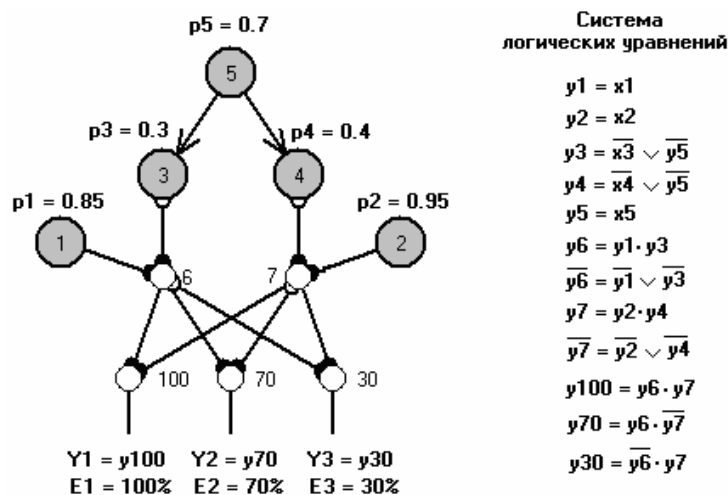


Рис.10. СФЦ реальной эффективности системы

На выходах фиктивных вершин 100, 70 и 30 представляются условия (критерии) функционирования системы с различными уровнями условной эффективности в 100%, 70% и 30% соответственно. Автоматизированное моделирование и расчет в программных комплексах АСМ реальной эффективности данной системы осуществляются на основе составного критерия

$$W = E_1 p(Y_1) + E_2 p(Y_2) + E_3 p(Y_3).$$

Результаты следующих этапов автоматизированного моделирования и расчета реальной эффективности двухэлементной системы (см. рис.5), полученные с помощью ПК АРБИТР, составляют:

$$Y_1 = y_{100} = \overline{x_5} \cdot x_1 \cdot x_2 \vee \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot x_1 \cdot x_2;$$

$$p(Y_1) = q_5 p_1 p_2 + q_3 q_4 p_5 p_1 p_2 = 0.479655;$$

$$Y_2 = y_{70} = y_6 \cdot \overline{y_7} = \overline{x_5} \cdot x_1 \cdot \overline{x_2} \vee \overline{x_3} \cdot x_1 \cdot \overline{x_2} \vee \overline{x_3} \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_1;$$

$$p(Y_2) = q_5 p_1 q_2 + q_3 p_5 p_1 q_2 + q_3 p_4 p_5 p_1 p_2 = 0.191845;$$

$$Y_3 = y_{30} = \overline{y_6} \cdot y_7 = \overline{x_5} \cdot \overline{x_1} \cdot x_2 \vee \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot x_5 \cdot x_2 \vee \overline{x_4} \cdot \overline{x_1} \cdot x_2;$$

$$p(Y_3) = q_5 q_1 p_2 + p_3 q_4 p_5 p_2 + q_3 q_4 p_5 q_1 p_2 = 0.204345;$$

$$W = E_1 p(Y_1) + E_2 p(Y_2) + E_3 p(Y_3) =$$

$$= 100\% \times 0.479655 + 70\% \times 0.191845 + 30\% \times 0.204345 = 67.525\%$$

Полученные результаты позволяют дополнительно определить вероятность нахождения системы в состоянии работоспособности (устойчивости)

$$P_v = p(Y_1) + p(Y_2) + p(Y_3) = 0.479655 + 0.191845 + 0.204345 = 0.875845,$$

которая совпадает с полученной в предыдущем примере оценкой комплексной устойчивости рассматриваемой системы.

Следует отметить, что разработанная СФЦ (см. рис.10), логическая и вероятностные функции реальной эффективности рассматриваемой системы являются немонотонными.

**Модель технического риска по надежности.** Технический риск, согласно РД-03-418-01, является одним из показателей риска аварии на опасном производственном объекте и оценивается вероятностью отказов технических устройств, приводящих к возникновению аварии с последствиями (ущерб, потери, разрушения и т.п.) определенного уровня (класса) за определенный период времени функционирования системы [19].

Для иллюстрации применения технологии АСМ в расчетах технического риска сначала воспользуемся ранее рассмотренной моделью надежности двухэлементной системы (см. СФЦ на рис.6). Положим, что различные комбинации  $Y_{Oj}$  отказов элементов приводят к авариям системы с различными уровнями  $F_j$  последствий, которые оцениваются в условных единицах ущерба (потерь):

- $Y_{O1} = \overline{y6} \cdot \overline{y7}, \quad F_1 = 100 \text{ ye};$
- $Y_{O2} = \overline{y6} \cdot y7, \quad F_2 = 70 \text{ ye};$
- $Y_{O3} = y6 \cdot \overline{y7}, \quad F_3 = 30 \text{ ye}.$

Для построения СФЦ технического риска (см. рис.11) ранее рассмотренная СФЦ надежности (см. рис.6) дополняется тремя фиктивными вершинами с номерами 100, 70 и 30 соответственно (см. рис.11).

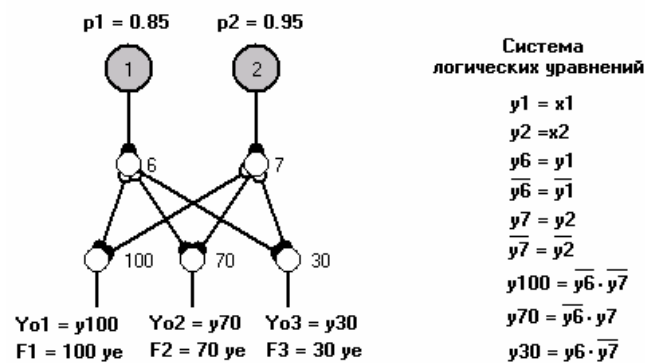


Рис.11. СФЦ технического риска по надежности

С помощью заходящих в вершины 100, 70 и 30 дуг логических связей функционального подчинения, от вершин 6 и 7 представляются логические условия возникновения различных аварий, а на их выходах задаются логические критерии аварии системы с различными уровнями последствий:

- $Y_{O1} = y_{100} = \overline{y6} \cdot \overline{y7}, \quad F_1 = 100 \text{ ye};$
- $Y_{O2} = y_{70} = \overline{y6} \cdot y7, \quad F_2 = 70 \text{ ye};$
- $Y_{O3} = y_{30} = y6 \cdot \overline{y7}, \quad F_3 = 30 \text{ ye}.$

Автоматизированное моделирование и расчет, с помощью ПК АРБИТР, технического риска  $R(F_j)$  по надежности рассматриваемой системы осуществляются отдельно по каждому из указанных критериев:

$$R(F_1) = p(Y_{O1}) = p(\overline{x1} \cdot \overline{x2}) = q1q2 = 0.15 \times 0.05 = 0.0075;$$

$$R(F_2) = p(Y_{O2}) = p(\overline{x1} \cdot x2) = q1p2 = 0.15 \times 0.95 = 0.1425;$$

$$R(F_3) = p(Y_{O3}) = p(x1 \cdot \overline{x2}) = p1q2 = 0.85 \times 0.05 = 0.0425.$$

Следует отметить, что СФЦ для анализа технического риска по надежности (см. рис.11) в целом, логические и вероятностные модели для аварий с последствиями 70 и 30 ye. являются немонотонными, несмотря на то, что исходная общая модель надежности системы была и остается монотонной по построению.

**Модель ожидаемого ущерба по надежности.** Ожидаемый ущерб, согласно РД-03-418-01, есть математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенное время [19].

Поэтому, для моделирования и расчета ожидаемого ущерба  $R$  по надежности может использоваться та же СФЦ технического риска, изображенная на рис.11. Только теперь для расчета ожидаемого ущерба с помощью ПК АСРБИТР необходимо задать соответствующий составной критерий

$$R = \sum_{j=1}^3 F_j \times p(Y_{O_j}).$$

На основе этого критерия ПК АСМ автоматически формирует модели и вычисляет значение ожидаемого ущерба по надежности системы

$$\begin{aligned} R &= \sum_{j=1}^3 F_j \times p(Y_{O_j}) = 100 \text{ ye} \times q_1 q_2 + 70 \text{ ye} q_1 p_2 + 30 \text{ ye} \times p_1 q_2 = \\ &= 100 \text{ ye} \times 0.0075 + 70 \text{ ye} \times 0.1425 + 30 \text{ ye} \times 0.0425 = 12 \text{ ye} \end{aligned}$$

**Модель ожидаемого ущерба по устойчивости.** ОЛВМ, технология и ПК АСМ позволяют расширить области анализа *технического риска* и *ожидаемого ущерба* на стойкость, живучесть и комплексную устойчивость систем исследуемых опасных производственных объектов и процессов. Для этого в рассматриваемом примере достаточно выполнить преобразования постановок задач в рассмотренных ранее моделях (см. рис.7, рис.8 и рис.9) аналогичные тем, которые были сделаны в двух предыдущих примерах.

Для иллюстрации этого выполним с помощью ПК АСМ автоматизированное построение моделей и расчет показателей технического риска и ожидаемого ущерба с учетом комплексной устойчивости рассматриваемой двухэлементной системы. Преобразованная для анализа рисков СФЦ структурной модели устойчивости (см. рис.9) изображена на рис.12.

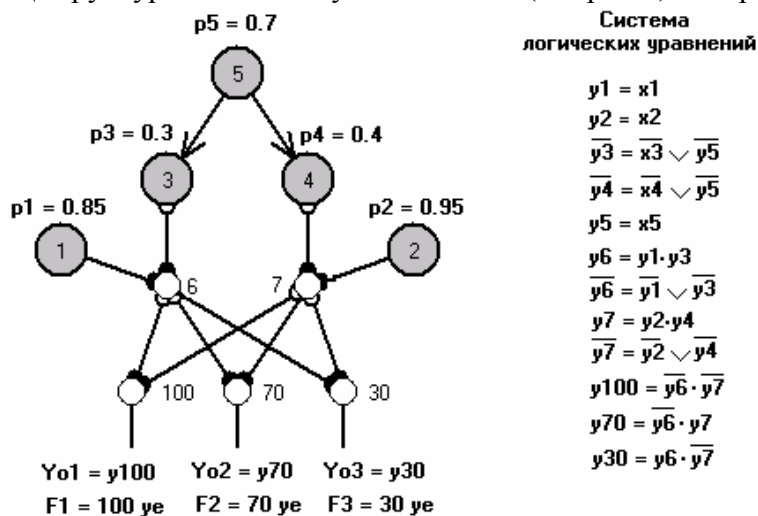


Рис.12. СФЦ риска по устойчивости

Здесь на выходах фиктивных вершин 100, 70 и 30 представлены условия (критерии) аварии системы с различными уровнями последствий в 100ye 70ye и 30ye соответственно (аналогично двум предыдущим примерам). Однако, в СФЦ на рис.12 учтены и надежность, и стойкость элементов к поражающему фактору, и вероятность его возникновения. Это позволяет с помощью ПК АСМ автоматически построить логические и вероятностные модели и рассчитать технический риск каждого вида возможной аварии и общий ожидаемый ущерб, вызванные отказами элементов и поражающими воздействиями. Результаты моделирования и расчетов показателей технического риска и ожидаемого ущерба системы по устойчивости, полученные с помощью ПК АСМ, следующие.

1. Технические риски по устойчивости:

$$R(F_1) = p(Y_{O1}) = p(x3 \cdot x5 \cdot \overline{x2} \vee \overline{x1} \cdot \overline{x2} \vee x3 \cdot x4 \cdot x5 \vee x4 \cdot x5 \cdot \overline{x1}) = \\ = p3 p5 p1 q2 + q1 q2 + p3 p4 p5 p2 + q3 p4 p5 q1 p2 = 0.124155;$$

$$R(F_2) = p(Y_{O2}) = p(\overline{x5} \cdot \overline{x1} \cdot x2 \vee x3 \cdot \overline{x4} \cdot x5 \cdot x2 \vee \overline{x4} \cdot \overline{x1} \cdot x2) = \\ = q5 q1 p2 + p3 q4 p5 p2 + q3 q4 p5 q1 p2 = 0.204345;$$

$$R(F_3) = p(Y_{O3}) = p(\overline{x5} \cdot x1 \cdot \overline{x2} \vee \overline{x3} \cdot x1 \cdot \overline{x2} \vee \overline{x3} \cdot x4 \cdot x5 \cdot x1) = \\ = q5 p1 q2 + q3 p5 p1 q2 + q3 p4 p5 p1 p2 = 0.191845.$$

2. Ожидаемый ущерб по устойчивости

$$R = \sum_{j=1}^3 F_j \times p(Y_{Oj}) = 100 \text{ ye} \times p(Y_{O1}) + 70 \text{ ye} \times p(Y_{O2}) + 30 \text{ ye} \times p(Y_{O3}) = \\ = 100 \text{ ye} \times 0.124155 + 70 \text{ ye} \times 0.204345 + 30 \text{ ye} \times 0.191845 = 32.475 \text{ ye}.$$

Рассмотренные тестовые примеры иллюстрируют основные положения практического применения общей технологии АСМ и подтверждают принципиальную возможность моделирования и расчета показателей всех наиболее важных отдельных и комплексных свойств устойчивости, эффективности и риска функционирования систем. При этом все основные модели и показатели определены с соответствием с действующими руководящими документами и государственными стандартами в области надежности, безопасности и риска сложных систем ОПО и ОИАЭ [19, 20, 22, 23 и др.].

Правильность решения всех рассмотренных выше тестовых примеров не сложно проверить вручную, что и предлагается сделать заинтересованному читателю. Теперь эту технологию можно применить для постановки и решения более сложных и высокоразмерных задач моделирования и расчета устойчивости, эффективности и риска функционирования реальных системных объектов с помощью ПК АРБИТР.

### **Опыт практического применения комплекса АРБИТР**

Эксплуатация программного комплекса АРБИТР осуществляется рядом организаций, которые имеют право на его промышленное применение.

**ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург, разработчик АРБИТР.** Выполнены проектные расчеты надежности АСУТП опасных производственных объектов: ООО "Кириши-нефтеоргсинтез", 6 проектов; ООО НПО "МИР", 1 проект; ООО "Мозырский НПЗ", Республика Беларусь, 4 проекта; ОАО "Казаньоргсинтез", Республика Татарстан, 2 проекта, ООО "ПРАЙМ ГРУП", Москва, 1 проект.

В ОАО "СПИК СЗМА" разработан руководящий документ "Автоматизированные системы управления. Надежность и безопасность. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчет надежности и безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами на стадии проектирования. Методические рекомендации". Методические рекомендации утверждены АО "Ассоциация "Монтажавтоматика" и разрешены Госгортехнадзором РФ (ныне - "РОСТЕХНАДЗОР") для опытного апробирования при проектировании АСУ ТП опасных производственных объектов.

**"Межотраслевой экспертно-сертификационный, научно-технический и контрольный центр ядерной и радиационной безопасности" (РЭСцентр), Санкт-Петербург.** Выполнено 13 проектов по расчету показателей надежности, остаточного ресурса и рисков объектов использования атомной энергии ФГУП "ПО Северное машиностроительное предприятие", г. Северодвинск.



**ЗАО "Компания СЗМА", Санкт-Петербург.** Выполнен расчет надежности Автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электрической энергии (АИС КУЭ) ФГУП "Петербургский метрополитен".

**ОАО "Гипрвостокнефть", г. Самара.** Выполняются работы по анализу надежности и безопасности систем объектов нефтехимической промышленности.

### **Результаты аттестации комплекса АРБИТР**

Комплекс АРБИТР (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0 [1], разработан в ОАО "СПИК СЗМА" в 2001-2005 г.г. АРБИТР реализует технологию АСМ и предназначен для автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности, стойкости, живучести, технического риска, эффективности и полного риска (ожидаемого ущерба) функционирования различных структурно-сложных систем ОПО и ОИАЭ.

На комплекс АРБИТР (ПК АСМ СЗМА) получено свидетельство №2003611101 от 12 мая 2003 года об официальной регистрации в РОСПАТЕНТ РФ.

В 2004-2005 годах комплекс АРБИТР (ПК АСМ СЗМА) и другие программы технологии АСМ применялись в комплексной НИР [17] трех организаций: СПБАЭП (ПК "Risk Spectrum", Швеция), ИПУ РАН (ПК "Relex", США) и ОАО "СПИК СЗМА" (ПК АСМ СЗМА, ПК АСМ 2000, ПК АСМ 2001 и др.). Технология и программные комплексы АСМ успешно прошли сравнительный анализ комплексами Relex (США) и Risk Spectrum (Швеция). В выводах этой НИР было сделано общее заключение всех трех организаций – исполнителей: *"Считаем целесообразным, объединить усилия организаций-исполнителей данной работы и приступить к разработке на базе ОЛВМ, технологии и ПК АСМ СЗМА отечественных специализированных программных комплексов автоматизированного структурно-логического статического и динамического моделирования, расчета показателей и оптимизации надежности, безопасности и риска функционирования сложных систем для различных отраслей промышленности"* [18].

В период 2005-2006 года комплекс АРБИТР проходил процедуру официальной аттестации в Совете по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ РОСТЕХНАДЗОРa РФ. В работе по аттестации приняли участие эксперты из ведущих проектных организаций: СПБАЭП, ВНИИАЭС, АЭП, НТЦ ЯРБ (Москва) и ОКБМ им. И.И.Африкантова (Нижний Новгород). В Отчете о верификации [2], разработанном заявителем (ОАО "СПИК СЗМА"), экспертам были представлены 10 расчетно-аналитических Тестов, состоящих из 42 примеров, включающих 184 различные задачи. Тесты охватывали следующие классы задач, которые может решать АРБИТР:

- вероятностный анализ надежности и возникновения аварийных ситуаций и аварий опасных объектов (Тест №1, 12 задач);
- надежность систем с множественными циклическими (мостиковыми) связями (Тест № 2, Тест №10, 20 задач);
- моделирование и расчет надежности фрагментов ядерных энергетических установок (Тест №3, 9 задач);
- расчет вероятностей вариантов сценария развития аварии (Тест №4, 6 задач);
- вероятностный анализ безопасности систем на основе деревьев отказов (Тест №5, Тест №3, Тест №10, 9 задач);
- типовые и нетиповые модели отказов по общей причине (Тест №6, Тест №7, 68 задач);
- модели надежности комбинаторных подсистем (Тест №8, Тест №4, 14 задач);
- моделирование систем большой размерности (Тест №9, Тест №10, 64 задачи).

В ходе аттестации было выдано задание на решение пяти Контрольных примеров "Моделирования и анализа систем безопасности и ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности" (5 примеров, 20 задач). При выполнении этого задания с помощью АРБИТР были получены и представлены экспертам три вида решений Контрольных примеров:

- приближенные решения всех пяти Контрольных примеров по методике аттестованного программного средства (ПС) CRISS 4.0 (совпали с заданием около 2000 сопоставляемых показателей);
- приближенные решения всех пяти Контрольных примеров по методике ПС Sapphire-7 (совпали более 2000 сопоставляемых показателей);
- дополнительно, с помощью АРБИТР, впервые были выполнены точные расчеты вероятностей вершинных событий деревьев отказов для трех выданных Контрольных примеров (модели с независимыми отказами элементов).

Контроль правильности решений Тестовых и Контрольных задач, полученных с помощью ПС АРБИТР, осуществлялся экспертами в соответствии с требованиями Положения об аттестации программных средств (РД-03-17-2001) путем сопоставления:

- с аналитическими решениями задач;
- с решениями, приведенными в литературных источниках;
- с решениями, полученными с помощью ранее аттестованных программных средств Risk Spectrum (Швеция) и CRISS 4.0 (РФ);
- с решениями, полученными с помощью программного комплекса Sapphire-7, имеющего лицензию Комиссии ядерного регулирования США;
- с решениями, полученными с помощью программного комплекса RELEX (США), широко используемого во многих странах мира.

В ходе аттестации у экспертов не было ни одного замечания по правильности решений с помощью АРБИТР всех 204 задач расчетно-аналитических Тестов и Контрольных примеров. На основании результатов экспертизы, проведенной Советом по аттестации ПС НТЦ ЯРБ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ (РОСТЕХНАДЗОР), на программное средство АРБИТР (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0, выдан Аттестационный паспорт № 222 от 21 февраля 2007 г. Комплекс аттестован на срок 10 лет и разрешен к применению на предприятиях РОСТЕХНАДЗОРа РФ.

В настоящее время проводятся работы по дальнейшему совершенствованию комплекса АРБИТР и его адаптации к различным специальным предметным областям промышленного применения.

### **Основные функциональные возможности комплекса АРБИТР**

В настоящее время комплекс АРБИТР реализует следующие функции (прошедшие процедуру аттестации):

- представление в исходной СФЦ (в суперграфе СФЦ) до 400 элементов (вершин) и до 100 элементов в каждой декомпозированной вершине (подграфах СФЦ) основного графа исследуемой системы (т.е. можно ввести до 40 000 вершин);
- автоматическое построение логических функций, представляющих пути функционирования, сечения отказов или их немонотонные комбинации (явные детерминированные модели исследуемых свойств системы);
- автоматическое построение вероятностных функций, обеспечивающих точный расчет показателей устойчивости, эффективности и риска исследуемых систем;
- расчет вероятности реализации заданных критериев, представляющих свойства устойчивости, эффективности и риска функционирования систем;

- расчет вероятности безотказной работы или отказа и средней наработки до отказа невосстанавливаемых систем;
- расчет коэффициента готовности, средней наработки на отказ, среднего времени восстановления и вероятности безотказной работы восстанавливаемых систем;
- расчет вероятности готовности смешанных систем, состоящих из восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов;
- расчет значимостей, положительных и отрицательных вкладов всех элементов исследуемой системы в вероятность реализации исследуемого свойства, используемые для выработки и обоснования управленческих решений по обеспечению устойчивости, живучести, безопасности эффективности и риска функционирования;
- приближенный расчет вероятностных показателей (без построения вероятностной функции), с отсечкой или без отсечки малозначимых путей и сечений;
- расчет вероятности реализации отдельных КПУФ или МСО системы;
- расчет значимости и суммарной значимости сечений отказов по Fussell-Vesely;
- расчет значимости, уменьшения и увеличения риска элементов по Fussell-Vesely;
- приближенный расчет вероятностных характеристик системы с учетом трех типов отказов элементов: отказ на требование, отказ в режиме работы и скрытый отказ в режиме ожидания (по методике, реализованной в ПК CRISS 4.0);
- структурный и автоматический учет отказов групп элементов по общей причине (модели альфа-фактора, бета-фактора и множественных греческих букв);
- учет различных видов зависимостей и множественных состояний элементов, представляемых с помощью групп несовместных событий;
- учет двухуровневой декомпозиции структурной схемы, дизъюнктивных и конъюнктивных кратностей сложных элементов (подсистем);
- учет неограниченного числа циклических (мостиковых) связей между элементами и подсистемами;
- учет различных комбинаторных отношений ( $K$  из  $N$ ) между группами элементов.

В основных режимах моделирования комплекса АРБИТР [1, 2] обеспечивается точный расчет показателей на основе автоматически формируемого правильного многочлена вероятностной функции во всем диапазоне возможных значений задаваемых параметров элементов. Вспомогательные режимы расчетов, реализованные в этом комплексе, позволяют получать приближенные значения вероятностных характеристик исследуемых свойств систем с такой же точностью, как и аттестованные программные средства Risk Spectrum [12], CRISS-4.0 [14] и Sapphire-7, имеющее лицензию Комиссии ядерного регулирования США.

В заключение данной статьи приводится пример практического применения технологии АСМ для моделирования и расчета показателей безотказности, отказа, возникновения и невозникновения *проектной аварии*, локализации запроектной аварийной ситуации и возникновения *запроектной аварии* [22] **Стенда физических измерений (СФИ)**. Анализ этого ОИАЭ был выполнен в Межотраслевом, экспертно-сертификационном научно-техническом и контрольном центре ядерной и радиационной безопасности (РЭСцентр), с помощью комплекса АРБИТР, по заказу ФГУП "ПО "СЕВМАШ". В полном объеме результаты этого анализа опубликованы в статье [21].

Подготовленная специалистами РЭСцентр СФЦ надежности и безопасности [23] стенда физических измерений изображена на рис.13.

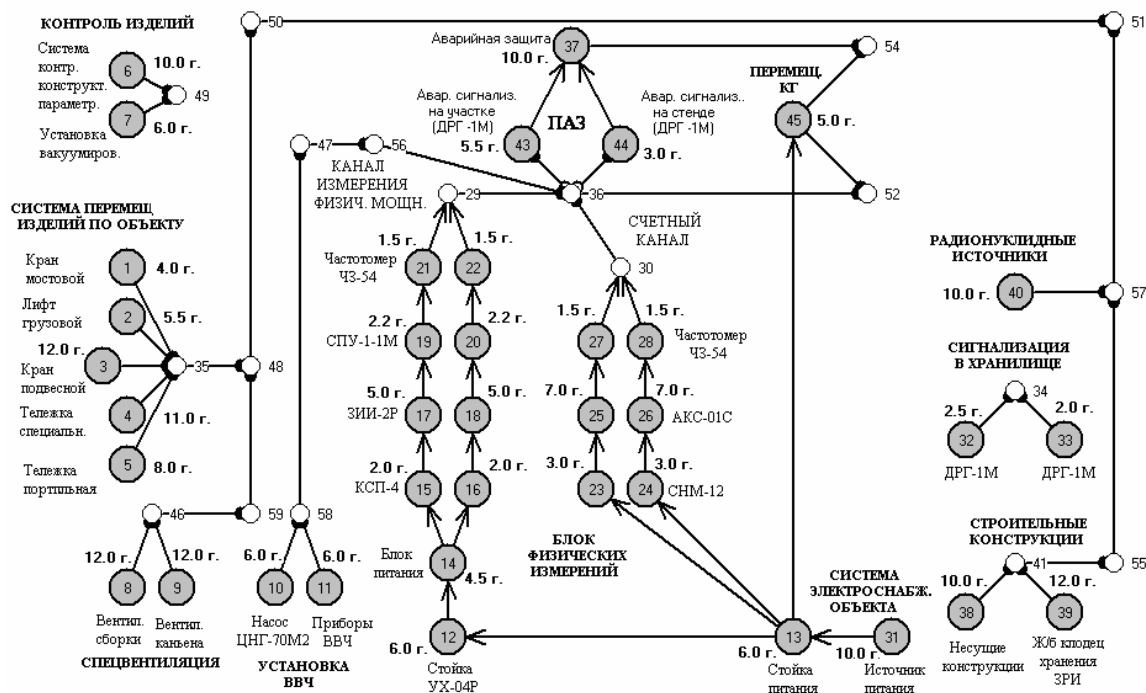


Рис.13. СФЦ работоспособности и безопасности стенда физических измерений

Функциональными вершинами на схеме обозначены события безотказной работы элементов СФИ. Приведены наименования соответствующих подсистем и элементов и значения их средних наработок до отказа в годах. В СФЦ представлены 13 подсистем (их наименования на рис.13 выделены), отказы элементов которых могут привести к функциональному отказу по надежности СФИ в целом, возникновению проектной аварии, локализации аварийных ситуаций и возникновению запроектной аварии (неуправляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления).

Все подсистемы СФИ представлены фрагментами СФЦ условий их работоспособности (безаварийности). Поэтому СФЦ, изображенная на рис.13, в целом подобна исходной функциональной схеме СФИ, и ее построение не вызывает больших затруднений.

На схеме представлено одно немонотонное условие (см. рис.13, инверсные выходы фиктивной вершины 36) возникновения отказов каналов блока физических измерений или установки воды высокой частоты. В этом случае для локализации запроектной аварии требуется безотказная работа подсистемы аварийной защиты (ПАЗ), а отказ этой подсистемы может привести к возникновению запроектной аварии (нелокализованной самоподдерживающейся цепной реакции деления).

В таблице 2 приведены основные результаты автоматизированного моделирования и вероятностного анализа надежности и безопасности СФИ, полученные с помощью комплекса АРБИТР.

Таблица 2. Результаты вероятностного анализа СФИ

№	Исследуемое свойство СФИ и логический критерий его реализации	Число КПУФ или МСО логической функции	Число одночленов вероятностной функции	Вероятность события
1	<b>Безотказность</b> $y_{49} \cdot y_{34} \cdot y_{51} \cdot y_{52}$	<b>4</b> (КПУФ)	<b>9</b>	$P_{СФИ}(1000ч) = 0.6346585752$
2	<b>Отказ</b> $y_{49} \vee y_{34} \vee y_{51} \vee y_{52}$	<b>46</b> (МСО)	<b>190</b>	$Q_{СФИ}(1000 ч) = 0.3653414248$
3	<b>Возникновение проектной аварии</b> $y_{51} \vee y_{54}$	<b>68</b> (немонотонн.)	<b>356</b>	$P_{ПА}(100ч) = 0.0220151844$

4	Невозникновение проектной аварии $\overline{Y_{51}} \cdot \overline{Y_{54}}$	9 (немонотонн.)	23	$Q_{ПА}(100ч) = 0.9779848156$
5	Локализация запроектной аварийной ситуации $\overline{Y_{36}} \cdot \overline{Y_{54}}$	58 (немонотонн.)	346	$P_{Лок.ЗАС}(100ч) = 0.0087402877$
6	Возникновение запроектной аварии исходного СФИ $\overline{Y_{36}} \cdot \overline{Y_{54}}$	89 (немонотонн.)	521	$P_{3А}(100ч) = 0.0030695642$
7	Возникновение запроектной аварии модернизированного СФИ $\overline{Y_{36}} \cdot \overline{Y_{54}}$	89 (немонотонн.)	2079	$P_{3А}(100ч) = 0.0000350589$

Моделирование и расчет надежности СФИ выполнены для наработки  $t = 1000$  часов (продолжительность типового цикла работы СФИ). Анализ безопасности выполнен для наработки  $t = 100$  часов (средняя продолжительности цикла физических измерений).

Результаты, приведенные в табл.1, показывают, что ПК АРБИТР позволяет строить прямые (безотказность, безаварийность) и обратные (отказ, авария) модели исследуемой системы (см. табл.1, задачи № 1, 2 и № 3, 4).

Задача №5 анализа локализации запроектной аварийной ситуации показала в каких ситуациях (их оказалось 58) и на сколько ПАЗ обеспечивает безопасность СФИ.

Задача №6 позволила выделить 89 возможных ситуаций возникновения запроектной аварии СФИ с наиболее тяжелыми последствиями (неуправляемой цепной ядерной реакции деления). При этом на основе вычисленных ПК АРБИТР положительных вкладов были определены элементы, увеличение безотказности которых позволяет в наибольшей степени уменьшить вероятность возникновения запроектной аварии. Ими оказались элементы 13 и 31 системы электроснабжения (см. рис.13). На этой основе было предложено модернизировать СФИ путем резервирования указанных элементов. Контрольный расчет показал (см. табл.1, задача №7) что это позволяет на два порядка уменьшить вероятность возникновения запроектной аварии.

Корректность решения комплексом АРБИТР задач данного примера подтверждена в отчете о верификации комплекса АРБИТР [2] сопоставлением полученных машинных результатов с ручными аналитическими решениями и контролем непротиворечивости прямого и обратного моделирования свойств надежности и безопасности СФИ.

**Заключение.** Большинство примеров, приведенных в настоящей статье, требуют построения немонотонных структурных, логических и вероятностных моделей. Поэтому другими известными монотонными технологиями и аттестованными программными средствами аналогичного назначения, эти задачи, в настоящее время, не решаются.

Полнота логической базы ОЛВМ и СФЦ впервые позволили в технологии и ПК АСМ реализовать автоматизированное моделирование и расчет большинства различных, но строго определенных ГОСТ и руководящими документами показателей свойств надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем, стойкости, живучести, комплексной устойчивости, технического риска и ожидаемого ущерба от аварий различных систем ОПО и ОИАЭ.

После завершения процедуры аттестации комплекса АРБИТР в ОАО "СПИК СЗМА" развернуты работы по его дальнейшему совершенствованию и внедрению ряда новых функциональных возможностей:

- детерминированного моделирования и определения системных последствий поражения любых групп элементов (детерминированная стойкость, условная живучесть системы);
- автоматического построения статистических моделей и оценки показателей устойчивости, эффективности и риска функционирования сложных систем большой размерности и высокой структурной сложности;
- автоматизированное технико-экономическое обоснование оптимальных проектных решений по обеспечению требуемых уровней надежности и безопасности разрабатываемых АСУ ТП опасных производственных объектов;
- расчет вероятностных характеристик устойчивости, эффективности и ожидаемого ущерба при задании любых начальных состояний системы;
- адаптация АРБИТР к выполнению работ по проектированию АСУ ТП;
- адаптация АРБИТР к подготовке расчетно-пояснительных записок деклараций промышленной безопасности и планов локализации и ликвидации аварий ОПО;
- учет различных законов распределения времени безотказной работы элементов и др..

Вопросы, изложенные в настоящей статье, являются базовыми для дальнейшего освоения заинтересованными читателями теории, технологии и программного комплекса АРБИТР автоматизированного структурно-логического моделирования разных свойств устойчивости, эффективности и риска функционирования различных видов и классов систем большой размерности и высокой структурной сложности. Подготовка и публикация этих материалов планируются в следующих изданиях журнала "Приборы и системы".

*Работа выполнена в ОАО "Специализированная инжиниринговая компания "Севзап-монтажавтоматика" (ОАО "СПИК СЗМА"), Санкт-Петербург.*

*Контактный телефон: +7 (812) 3505885*

*E-mail: [Alexander\\_Mozhaev@szma.com](mailto:Alexander_Mozhaev@szma.com)*

## **Список литературы**

1. АРБИТР, "Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0". Автор Можяев А.С. Правообладатель ОАО "СПИК СЗМА". // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611101. М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003. // Аттестационный паспорт №222 от 21 февраля 2007 г., выдан Советом по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) РФ.
2. 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" (АРБИТР, ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0). Заключительная редакция с приложениями. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2007. – 1031 с.
3. Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988. - 68с.
4. 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).
5. Черкесов Г. Н., Можяев А.С. Логико-вероятностные методы расчета надежности структурно-сложных систем. // В кн. Надежность и качество изделий. М.: Знание, 1991, с. 34-65.
6. Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод и технология моделирования безопасности сложных систем. Многотомное издание "Безопасность России". Анализ риска и проблем безопас-

- ности. В четырех частях. Часть III. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов, 2007, 816 с. (с. 243-293).
7. Можаяев А.С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование систем. Учебник. СПб: ВМА им Кузнецова Н.Г, 2006. - 590 с.
  8. Можаяев А.С., Гладкова И.А. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем 2001 (ПК АСМ 2001). // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099. М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003.
  9. Можаяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной Научной Школы 'Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах' (МА БРК – 2001). СПб.: Издательство ООО 'НПО 'Омега', 2001, с.56-61.
  10. Можаяев 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, 2003.
  11. Можаяев А.С. Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем. // Труды Международной научной школы: "Моделирование и анализ безопасности, риска в сложных системах" (МА БР – 2003). СПб.: СПбГУАП, 2003, с.101-110.
  12. Risk Spectrum PSA Professional 1.20 / Theory Manual. RELCON AB, 1998. - 57p.
  13. Викторова В.С., Кунтшер Х., Петрухин Б.П., Степанянц А.С. Relex - программа анализа надежности, безопасности, рисков. // "Надежность" №4(7), 2003, с. 42-64.
  14. 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". Часть 1 (Заключительная редакция). Нижний Новгород: ФГУП ОКБМ им. И.И.Африкантова, 2005. - 88 с.
  15. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981.
  16. Рябинин И.А. Три кита ВМФ: надежность, живучесть, безопасность. Новочеркасск: ООО НПО "Темп", 2006, - 116 с.
  17. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007 г., 278 с.
  18. 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.
  19. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996, 15 с.
  20. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Серия 3. Выпуск 10. М.: Госгортехнадзор России, НТЦ "Промышленная безопасность", 2001, 60 с.
  21. Ш.В.Камынов, М.И.Рылов, А.С.Можаяев, А.А.Нозик. Методика применения программного комплекса АСМ СЗМА для расчета показателей безотказности и безаварийности стенда физических измерений. // Журнал "Управление риском", №1. М.: Издательство "АНКИЛ", 2007, с. 63-72.
  22. НП-038-02. Общие положения обеспечения безопасности радиационных источников. // Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. М.: Госатомнадзор России, 2002, - 37 с.
  23. НП-024-200. Требования к обоснованию возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии. // Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. М.: Госатомнадзор России, 2000, - 15 с.