



БЕЗЪАПМОНТАЖАВТОМАТИКА

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ОАО "СПИК СЗМА"

А.А.Нозик

"__" _____ 2007 г.

ОТЧЕТ О ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА

**"Программный комплекс автоматизированного
структурно-логического моделирования и расчета
надежности и безопасности систем"**

(ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0)

(Заключительная редакция)

ПК АСМ СЗМА принят к аттестации 07 июня 2005 г. на заседании Секции № 5
Совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре РФ
в Научно - техническом центре по ядерной и радиационной безопасности.

Все материалы, опубликованные в заключительной редакции "Отчет о верификации программного средства", являются собственностью ОАО «СПИК СЗМА». Любое использование материалов (полное или частичное их копирование, тиражирование, перевод на другие языки, публикация где-либо, включая электронные и печатные носители информации, а также веб-сайты) без письменного разрешения ОАО «СПИК СЗМА» является нарушением Закона об авторских правах. При использовании материалов с разрешения авторов, ссылка на "Отчет о верификации программного средства" ПК АСМ СЗМА обязательна.

Санкт-Петербург, 2007 г.

ИСПОЛНИТЕЛИ

Ведущий специалист ОАО «СПИК СЗМА»	Можаев А.С.
Ведущий программист ОАО «СПИК СЗМА»	Киселев А.В.
Ведущий специалист ОАО «СПИК СЗМА»	Струков А.В.
Ведущий инженер ОАО «СПИК СЗМА»	Скворцов М.С.

АННОТАЦИЯ

Настоящий документ разработан ОА "СПИК СЗМА" по решению членов Секции № 5 Совета по аттестации программных средств (ПС), принятому 21 ноября 2006 г., в ходе обсуждения итогов аттестации и утверждения проекта Аттестационного паспорта ПС "ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0". Поэтому настоящий документ не является новым Отчетом о верификации (ОВ), а представляет собой заключительную редакцию официального Отчета о верификации (передан в ЦОЭП 21 ноября 2005 г., акт приема-передачи №592), по которому была проведена экспертиза ПС "ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0".

В целях более удобного использования, заключительная редакция ОВ связывает воедино материалы ее первоначальной редакции и дополнительные материалы, разработанные в ходе аттестации Комплекса при ответах на вопросы, замечания и предложения экспертов. Поэтому, при разработке заключительной редакции ОВ за основу были приняты следующие положения:

1. Материалы исходного текста Отчета о верификации, которые были приняты экспертами без замечаний и предложений, в заключительной редакции сохранены без содержательных изменений;
2. Внесенные в заключительную редакцию ОВ изменения соответствуют исправлениям программного кода аттестуемой версии ПК АСМ СЗМА, которые были выполнены при устранении замечаний экспертов (исправленный ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0 установленным порядком передан в ЦОЭП 02 ноября 2006 г., акт приема-передачи №592/1);
3. Изменения и дополнительные материалы, внесенные в заключительную редакцию Отчета о верификации, соответствуют ответам на замечания и предложения экспертов, которые были переданы им в письменной форме в ходе аттестации ПК АСМ СЗМА;
4. Рисунки экранных форм в заключительной редакции ОВ заменены новыми, в которых отражены исправления, внесенные в ПК АСМ СЗМА в ходе устранения замечаний и реализации предложений экспертов.

За время аттестации увеличилось число примеров. Поэтому в заключительной редакции ОВ, для удобства изложения и восприятия материалов, общее описание расчетных и аналитических Тестов вынесено в отдельное приложение 1.

В приложении 2 заключительной редакции ОВ приведено описание решений с помощью ПК АСМ СЗМА пяти Контрольных примеров анализа систем безопасности и ядерной установки, выданных в ходе аттестации. Решение Контрольных примеров выполнено по рекомендации Председателя Секции №5 Совета по аттестации ПС, эксперта Ершова Г.А.

При решении Контрольных примеров в ПК АСМ СЗМА использовались специальные приближенные методы моделирования и расчетов показателей, разработанные специалистами ОКБМ им. И. И. Африкантова [69]:

- методы расчета вероятностей базисных событий с учетом трех типов отказов элементов (отказ на требование, отказ в режиме работы и скрытый отказ в режиме ожидания);
- методы расчета вероятностей конъюнкций, представляющих МСО, с учетом указанных трех типов отказов элементов;
- методы расчета показателей значимостей и суммарных значимостей МСО по Fussell-Vesely.

Эти методы впервые были разработаны и реализованы авторами в аттестованном ПС "CRISS 4.0", и опубликованы в верификационном отчете [69]. Разрешение авторов на внедрение указанных методов в ПК АСМ СЗМА получено 27 июля 2006 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1. ОПИСАНИЕ ПК АСМ СЗМА	18
1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ПК АСМ СЗМА	18
1.2. БЛОК-СХЕМА ПК АСМ СЗМА	27
1.2.1. Интерфейс пользователя	28
1.2.2. Модули подготовки, ввода и преобразования исходных данных	30
1.2.3. Библиотека модулей "ЛОГ&ВФ"	31
1.2.4. Модули вычислений вероятностных характеристик	31
1.2.5. Библиотека "Проекты"	32
1.2.6. Утилита расчета вероятностных характеристик односвязных комбинаторных подсистем К из N методом агрегирования	33
1.2.7. Утилита расчета вероятностных характеристик односвязных комбинаторных подсистем К из N методом формирования комбинаций	35
1.2.8. Утилита расчета вероятностей базовых событий групп элементов, отказывающих по общей причине	38
1.3. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПК АСМ СЗМА	39
1.4. МАТРИЦА ВЕРИФИКАЦИИ ПОГРАММНОГО СРЕДСТВА	43
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПК АСМ СЗМА	47
2.1. ОБЩИЙ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД	51
2.1.1. Изобразительные средства и типовые фрагменты СФЦ	52
2.1.1.1. Функциональные вершины СФЦ	53
2.1.1.2. Дизъюнктивные ребра (дуги) в СФЦ	54
2.1.1.3. Фиктивные вершины в СФЦ	56
2.1.1.4. Конъюнктивные дуги в СФЦ	58
2.1.1.5. Совместное применение дизъюнктивных и конъюнктивных дуг в СФЦ	59
2.1.1.6. Размножение функциональных вершин	61
2.1.1.7. Представление логической операции инвертирования в СФЦ	62
2.1.2. Обобщенный структурный фрагмент СФЦ	63
2.1.3. Эквивалентированные вершины в СФЦ	65
2.1.4. Логическое моделирование в ПК АСМ СЗМА	67
2.1.5. Вероятностное моделирование в ПК АСМ СЗМА	75
2.1.6. Выполнение расчетов в ПК АСМ СЗМА	78
2.1.6.1. Расчет статических вероятностных показателей систем	79
2.1.6.2. Расчет показателей безотказности невосстанавливаемых систем	79
<i>Расчет вероятности безотказной работы</i>	79
<i>Расчет средней наработки до отказа</i>	80
2.1.6.3. Расчет показателей безотказности восстанавливаемых систем	81
<i>Расчет коэффициентов готовности элементов</i>	81
<i>Расчет коэффициента готовности восстанавливаемой системы</i>	82
<i>Расчет средней наработки на отказ и среднего времени восстановления</i>	83
<i>Расчет вероятности безотказной работы восстанавливаемой системы</i>	83
2.1.6.4. Расчет вероятностных характеристик смешанных систем	84
2.1.6.5. Расчет значимостей и вкладов элементов	85
<i>Расчет значимости элементов системы</i>	85
<i>Положительные и отрицательные вклады элементов системы</i>	87
2.1.7. Учет стохастически зависимых событий	87
2.1.8. Учет собственного времени работы элементов	88
2.1.9. Использование кратных вершин	89
2.1.10. Использование признаков законов распределения элементов	90
2.1.11. Показатели, вычисляемые в режиме "Приближенные расчеты"	90

2.2. ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	92
2.2.1. Содержание формализованной постановки задачи	93
2.2.2. Методика построения СФЦ	95
2.2.2.1. Общие положения	95
2.2.2.2. Этапы построения СФЦ	97
3. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЙ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ И КОНТРОЛЬНЫХ ПРИМЕРОВ	100
3.1. Расчетный и аналитический Тест №_1. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СТЕНДА ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	101
3.2. Расчетный и аналитический Тест №2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	104
3.3. Расчетный и аналитический Тест №3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ФРАГМЕНТА ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ.....	107
3.4. Расчетный и аналитический Тест №4. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВАРИАНТОВ СЦЕНАРИЯ РАЗВИТИЯ АВАРИИ, ЗАДАННОГО ДЕРЕВОМ СОБЫТИЙ.....	110
3.5. Расчетный и аналитический Тест №5. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ	113
3.6. Расчетный и аналитический Тест №6. ТИПОВЫЕ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ.....	116
3.7. Расчетный и аналитический Тест №7. НЕТИПОВЫЕ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ.....	119
3.8. Расчетный и аналитический Тест №8. МОДЕЛИ КОМБИНАТОРНЫХ ПОДСИСТЕМ..	122
3.9. Расчетный и аналитический Тест №9. ДВУХУРОВНЕВАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ И АППАРАТ КРАТНОСТИ В АНАЛИЗЕ ВЫСОКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ	125
3.10. Расчетный и аналитический Тест №10. ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ МОДЕЛЕЙ..	128
3.11. Контрольные примеры. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ И ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ.....	131
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ И ОБОСНОВАНИЯ ПК АСМ СЗМА	143
<i>Обоснованность использования ОЛВМ и аппарата СФЦ</i>	<i>144</i>
<i>Автоматическое построение логических ФРС</i>	<i>146</i>
<i>Автоматическое построение многочленов ВФ.....</i>	<i>147</i>
<i>Выполнение расчетов вероятностных показателей</i>	<i>148</i>
<i>Дополнительные сведения об ограничениях ПК АСМ СЗМА.....</i>	<i>150</i>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
ПЕРЕЧЕНЬ ИСТОЧНИКОВ	157
ПРИЛОЖЕНИЯ	164

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

АСМ	–	автоматизированное структурно-логическое моделирование
АСУ	–	автоматизированная система управления
Безопасность	–	свойство защищенности системного объекта от опасностей возникновения аварийных ситуаций и аварий, вследствие отказов его элементов и подсистем
ВАБ	–	вероятностный анализ безопасности
ВВЧ	–	вода высокой чистоты
ВФ	–	вероятностная функция (многочлен)
ГНС	–	группа несовместных событий
КН	–	конденсатный насос
ЗРИ	–	закрытые радионуклидные источники
ЗАС	–	запроектная аварийная ситуация
ЗА	–	запроектная авария
КГ	–	компенсирующая группа (стержней)
Корректность	–	правильность, в рамках принятых ограничений и допущений
КПУФ	–	кратчайшие пути успешного функционирования
ЛВИ	–	Логико-вероятностное исчисление
ЛКФ	–	логический критерий функционирования
ЛВМ	–	логико-вероятностные методы
ЛОГ@ВФ	–	библиотека программных модулей построения логических и вероятностных математических моделей исследуемых систем
МСО	–	минимальные сечения отказов
НИР	–	научно-исследовательская работа
Надежность	–	свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования (ГОСТ 27.002-89, [64])
ОАО "СПИК СЗМА"	–	открытое акционерное общество "Специализированная инжиниринговая компания "Севзапмонтажавтоматика", Санкт-Петербург (разработчик "ПК АСМ СЗМА").
ОПО	–	опасный производственный объект
ОИАЭ	–	объект использования атомной энергии
ООП	–	отказы по общей причине
ОЛВМ	–	общий логико-вероятностный метод
ОВ	–	Отчет о верификации программного средства " Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета показателей надежности и безопасности систем, базовая версия 1.0"
ПК	–	программный комплекс

ПК АСМ СЗМА	–	программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета показателей надежности и безопасности систем, базовая версия 1.0, разработан ОАО "СПИК СЗМА", представлен к аттестации
ПАС	–	проектная аварийная ситуация
ПАЗ	–	противоаварийная защита
П	–	перемычка
ПН	–	питательный насос
ПГ	–	парогенератор
ПК	–	питательный клапан
РЭСцентр	–	межотраслевой экспертно-сертификационный, научно-технический и контрольный центр ядерной и радиационной безопасности, Санкт-Петербург
СФЦ	–	схема функциональной целостности
СФИ	–	стенд физических измерений
СЦР	–	самоподдерживающаяся цепная реакция
СЭС	–	система электроснабжения
СГК	–	секция главного конденсатора
СПВ	–	система поддержания вакуума
Технический риск	–	вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта и которая определяется соответствующими методами теории надежности (РД 03-418-01, "Методические указания по проведению анализа риска ОПО" Госгортехнадзора РФ [34])
ТГ	–	турбогенератор
УГМ	–	универсальный графоаналитический метод решения систем логических уравнений и определения ФРС
ФРС	–	функция работоспособности системы (логическая)
ФИ	–	канал физических измерений
ЯЭУ	–	ядерная энергетическая установка

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая заключительная редакция отчета содержит материалы по верификации программного средства (ПС):

"Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем" ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0. (далее по тексту: "ПК АСМ СЗМА" или "Комплекс") [1-4].

Аттестация данного Комплекса проведена по Договору № 227-Ц/2005 от 21.07.2005 г. между Предприятием ООО "ЦЕП НУКЛОН" (Исполнитель, Москва) и Компанией ОАО "СПИК СЗМА" (Заказчик, Санкт-Петербург). По результатам проведенной экспертизы, 21 ноября 2006 г. на заседании Секции №5 Совета по аттестации ПС был утвержден текст проекта Аттестационного паспорта ПС: "ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0" (см. Заключение).

В ПК АСМ СЗМА автоматизированное структурно-логическое моделирование основывается на общем логико-вероятностном методе системного анализа [5, 29], в котором аппарат алгебры логики используется для структурного и аналитического описания свойств надежности и/или безопасности (технического риска) системных объектов, а количественная оценка указанных свойств выполняется с помощью теории вероятности [31, с.22].

Свойства **"надежность"** и **"безопасность"** в настоящем отчете рассматриваются применительно к структурно-сложным системам, включая объекты использования атомной энергии (ОИАЭ) и другие опасные производственные объекты (ОПО). Содержание указанных свойств в представленной к аттестации базовой версии ПК АСМ СЗМА ограничено рамками следующих понятий и показателей:

- **надежность** - включают свойства и показатели "**безотказности**" и "**ремонтотпригодности**" системного объекта, определенные согласно ГОСТ 27.002-89;
- **безопасность** – включает свойство "**технического риска**" возникновения или невозникновения аварийных ситуаций и аварий системного объекта с последствиями определенного уровня (класса), вследствие отказов его технических устройств (элементов), показатели которого определяется соответствующими методами теории надежности [34].

Относительно общего понятия "риск", установленного в [34, 38, 65], используемые здесь понятия "безопасность" и "технический риск" охватывают только первую, вероятностную составляющую полного риска, т.е. не включают в себя непосредственную оценку последствий аварий, которые могут возникнуть вследствие отказов элементов по надежности.

Представленное к аттестации ПС – "**ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0**" содержит:

1. **Основной блок** программных модулей ПК АСМ СЗМА [1-4] с внедренной в него библиотекой "ЛОГ&ВФ" [27] (LOG_WF.bpl), предназначенный для автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем, многочленов вероятностных функций и выполнения расчетов вероятностных показателей надежности и безопасности (технического риска) структурно-сложных систем различного назначения, включая объекты использования атомной энергии (ОИАЭ) и другие опасные производственные объекты (ОПО);
2. Три **встроенные программные утилиты** (процедуры), выполняющие:
 - расчет статических вероятностей одиночных и групповых отказов (базовых событий) для трех типовых моделей отказов элементов по общей причине (модели бета-фактора, множественных греческих букв и альфа-фактора);

- расчет вероятностных характеристик надежности односвязных однородных (все элементы одинаковые) комбинаторных подсистем "K/N" (K из $N \leq 30$) методом агрегирования;
- моделирование и расчет вероятностных характеристик надежности односвязных неоднородных комбинаторных подсистем "K/N" (K из $N \leq 20$) методом формирования комбинаций.

На ПК АСМ СЗМА и внедренную в него библиотеку ЛОГ&ВФ получены свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ в РОСПАТЕНТе РФ (№ 20033611101 и №2003611100 от 12 мая 2003 г.).

ПК АСМ СЗМА не использует автономно функционирующих баз данных и программных средств. Программа работает с автоматически формируемой файловой системой "**Проекты**", в которой размещаются, сохраняются и используются разрабатываемые и ранее разработанные проекты (схемы функциональной целостности, параметры элементов и результаты моделирования и расчетов) в форматах, недоступных для других программ.

Автор ПК АСМ СЗМА: ведущий специалист ОАО "СПИК СЗМА" Можяев Александр Сергеевич.

Организация-разработчик, правообладатель и заявитель ПК АСМ СЗМА: Открытое акционерное общество "Специализированная инжиниринговая компания "Севзапмонтажавтоматика" (ОАО "СПИК СЗМА"), Санкт-Петербург.

ПК АСМ СЗМА **применяют** следующие организации:

1. ОАО "Специализированная инжиниринговая компания "Севзапмонтажавтоматика", Санкт-Петербург, разработчик ПК АСМ СЗМА.

2. Межотраслевой экспертно-сертификационный, научно-технический и контрольный центр ядерной и радиационной безопасности (РЭСцентр). Акт приема-передачи ПК АСМ СЗМА от 21 мая 2003 г.
3. Трест "Севзапмонтажавтоматика", Санкт-Петербург. Акт передачи ПК АСМ СЗМА от 21 июня 2004 г.
4. ОАО "Гипровостокнефть", г. Самара. Акт передачи ПК АСМ СЗМА от 03 августа 2006 г.

Операционная система ПК АСМ СЗМА - Microsoft Windows XP Professional, Version 5.1(Build 2600.xpsp 1.020828-1920: Service Pack 1), Copyright © 1981-2001 Microsoft Corporation, CD SET: X08-40893. Комплекс может использоваться в операционной системе, поддерживающей интерфейс разработки приложений Win32 API (Windows 95, Windows 98, Windows Me, Windows NT, Windows XP, Windows 2003).

Система программирования ПК АСМ СЗМА - Borland Delphi Professional, Version 7.0 (Build 4.453), Copyright © 1983-2002, Borland Software Corporation, Registration Key: 9617613.

Для работы ПК АСМ СЗМА требуется **компьютер** класса IBM-PC, с процессором Pentium II и выше.

Теоретической и методологической основой представляемого к аттестации ПК АСМ СЗМА являются разработанные автором в середине 80-х начале 90-х годов общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) системного анализа [5, 29], в котором используется специальный графический аппарат описания структур свойств надежности и безопасности исследуемых систем *схемы функциональной целостности* (СФЦ). На основе ОЛВМ и аппарата СФЦ созданы теория, новая информационная технология автоматизированного структурно-логического

моделирования (АСМ) [6, 7, 26], и разработан ряд образцов программных комплексов, включая ПК АСМ СЗМА.

Практическое применение получили несколько предыдущих версий программных комплексов, реализующих ОЛВМ, СФЦ и технологию АСМ:

- ПК АСМ 1983-1985 г., ЭВМ БЭСМ-4, ЕС-ЭВМ, алгоритмические языки Алгол-60, ПЛ-1, автор и разработчик программ Можаяев А.С.;
- ПК АСМ версии "ИСЛАМ", 1989-1990 г., СМ-ЭВМ, алгоритмический язык Pascal, авторы: Можаяев А.С., Алексеев А.О., Травин Э.В. [40];
- ПК АСМ версия 5.0, DOS, 1990 г., первые ПЭВМ, алгоритмический язык Basic, авторы Можаяев А.С., Алексеев А.О. [9, 10];
- ПК NEWАСМ версии 2.01, 1994 г. DOS, алгоритмический язык Си-2, авторы: Можаяев А.С., Ершов Г.А., Татусьян О.В. [8, 11];
- ПК АСМ 2000, 2000 г., Windows, алгоритмический язык Visual Basic, автор Можаяев А.С.;
- ПК АСМ-НИЦ БТС, 2000 г., Windows, алгоритмический язык Delphi-6, автор Можаяев А.С. [12];
- ЛОГ & ВФ, 2002 г. - библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций, алгоритмический язык Object Pascal в среде Delphi, ver.7, авторы: Можаяев А.С., Гладкова И.А., [26, 27], Санкт-Петербург, свидетельство о регистрации № 2003611100 от 12 мая 2003 г., Москва, "Роспатент" РФ;
- ПК АСМ 2001, 2001 г., Windows, алгоритмический язык Object Pascal в среде Delphi, ver.7, авторы Можаяев А.С., Гладкова И.А. [13], Санкт-Петербург, свидетельство об официальной регистрации № 2003611099 от 12 мая 2003 г., Москва, "Роспатент" РФ (прототип представляемого к аттестации ПК АСМ СЗМА);

- ПК АСМ СЗМА, 2002-2005г. [1-4], Windows, алгоритмический язык Object Pascal в среде Delphi, ver.7, разработчик и правообладатель ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург, автор Можяев А.С., свидетельство об официальной регистрации № 2003611101 от 12 мая 2003 г. Москва, "Роспатент" РФ, (представлена к аттестации).

Основные функциональные возможности предыдущих версий ПК АСМ реализованы в представленной к аттестации базовой версии ПК АСМ СЗМА [1-4]. Ее прототипом является ПК АСМ 2001 [13]. Главные отличия ПК АСМ СЗМА от прототипа состоят в создании нового, более удобного (адаптированного к проектированию систем) интерфейса пользователя и двухуровневой реализации принципов односвязной структурной декомпозиции [5, 42], что позволяет существенно повысить размерность исследуемых системных объектов.

К настоящему времени накоплен **опыт эксплуатации** представленной к аттестации базовой версии **ПК АСМ СЗМА** и предыдущих версий, реализующих технологию АСМ. Например, были выполнены работы:

- ПК АСМ НИЦ БТС и технология АСМ применялись для оценки исходов возможных аварийных ситуаций в ходе проведения работ по подъему атомного подводного крейсера "Курск" [12, 14];
- с помощью версии ПК АСМ 2001 [13] (прототипа ПК АСМ СЗМА):
 - проведены оценки вероятности различных последствий ядерных и радиационных аварий, потенциально возможных при выполнении комплекса работ по утилизации атомных подводных лодок [19, 35];
 - выполнены расчеты надежности, безопасности и риска при подготовке расчетно-пояснительных записок планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) объектов ООО "Киришинефтеоргсинтез" [18, 4, 41];
- непосредственно с помощью ПК АСМ СЗМА:

- выполнены расчеты показателей надежности объекта № 635 (Центральное хранилище изотопов) ФГУП "Северное машиностроительное предприятие", г. Северодвинск (отчет рег. № 3-03/05 от 25.01.2005 г. по договору № 04/739/2506965 от 10.03.2004 г. между ФГУП "ПО "Севмаш" и ООО "РЭСцентр") [15], а также ряда других объектов использования атомной энергии, расположенных на территории данного предприятия, в рамках проведения работ по продлению сроков эксплуатации ОИАЭ (в соответствии с НП-024-200 Госатомнадзора России);
- основные методические положения и рекомендации по применению технологии и ПК АСМ использованы при разработке "Методики определения остаточного ресурса объектов использования атомной энергии" (Инв.№ 25.11-1.03.137-2004 ФГУП "ПО "Северное машиностроительное предприятие", г. Северодвинск) [17], одобренной Управлением судостроительной промышленности Федерального Агентства по промышленности письмом с исх. № 02-388 от 23.11.04 г., согласованной Управлением по регулированию безопасности исследовательских ядерных установок, ядерных энергетических установок судов и радиационно-опасных объектов Ростехнадзора 10.12.2004 г. (введена в действие 15.12.2004 г.);
- разработана программа управления надежностью (ресурсом) объекта использования атомной энергии (РЭСцентр, рег. № Р-21/05) [16];
- выполнены проектные оценки надежности АСУТП для шести объектов ООО "Киришинефтеоргсинтез" (техническая документация ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург, 2001-2003 гг.) [43-45, 47-49];
- выполнены оценки надежности четырех объектов ООО "Мозырский НПЗ" Республики Беларусь (техническая документация ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург, 2002, 2004 гг.) [46, 52-54];

- выполнены проектные оценки надежности двух объектов ОАО "Казань-оргсинтез", Республика Татарстан (техническая документация ОАО "СПИК СЗМА", г Санкт-Петербург, 2004 г.) [50, 51].

В ходе проведения тремя организациями СПБАЭП, ИПУ РАН и ОАО "СПИК СЗМА комплексной НИР [20] (см. приложение 2) заявленные к аттестации функциональные возможности ПК АСМ СЗМА были успешно **сопоставлены** с двумя зарубежными программными комплексами:

- **Risk Spectrum** (Швеция), аттестован в НТЦ ЯРБ в 2003 г. [20, 23, 24, 25];
- **Relex** (США), широко используется во многих странах [20, 21, 22, 66].

В общих выводах этой НИР было сделано единодушное заключение всех трех организаций (цитируем [20], см. приложение 2, с.280, п.3): *"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"*.

После завершения НИР [20], из докладов [62, 67] стало известно, что специалисты СПБАЭП (Ершов Г.А., Ермакович Ю.Л., Легошин П.В., Парфеньев М.А., Фролов А.С.) совместно со специалистами ФГУП "Атомэнергопроект" г. Москвы (Швыряев Ю.В., Морозов В.Б. и др.) приступили к разработке собственного программного комплекса "БАРС" (Безопасность и Анализ Риска Систем). Как следует из [62, 67] этот программный комплекс так же основан на ОЛВМ и технологии АСМ. Авторы сообщают, что ПК *предназначен для автоматизированного и расчета показателей надежности, живучести, безопасности сложных организационно-технических систем, ВАБ объектов атомной энергетики и*

опасных производственных объектов. Он аккумулирует лучшие свойства ПК RISK-Spectrum, Relex, CRIS, RISK и основан на альтернативных методах графического (схемы функциональной целостности) и логико-вероятностного (общий логико-вероятностный метод) моделирования.

Выбор специалистами СПБАЭП и ФГУП "Атомэнергопроект" г. Москвы Общего логико-вероятностного метода, аппарата СФЦ и технологии АСМ для создания собственного ПК "БАРС" позволяет нам сделать вывод о признании методов, теории и технологии, разработанных и реализованных в ПК АСМ СЗМА, правильными и перспективными для выполнения вероятностного анализа надежности и безопасности ОИАЭ и других ОПО.

В соответствии с п.22 Положения об аттестации ПС [36], настоящий верификационный отчет содержит:

- описание представленного к аттестации программного средства "ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0", предназначенного для автоматизированного моделирования и расчетов вероятностных показателей свойств надежности (безотказности и восстанавливаемости) и безопасности (технического риска возникновения или не возникновения аварийных ситуаций и аварий вследствие отказов элементов [34]) структурно-сложных системных объектов, включая ОИАЭ и другие ОПО (раздел 1);
- описание и обоснование используемых в ПК АСМ СЗМА теоретических и методических основ (общего логико-вероятностного метода, схем функциональной целостности и методик их применения) технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (раздел 2);
- описание основных результатов испытаний ПК АСМ СЗМА в ходе решения тестовых задач и контрольных примеров (раздел 3);
- описание результатов верификации и обоснования ПК АСМ СЗМА (раздел 4).

1. ОПИСАНИЕ ПК АСМ СЗМА

Полное описание программного комплекса ПК АСМ СЗМА приведено в технической документации, находящейся в организации-разработчике данного ПК – ОАО "СПИК СЗМА", в публикациях [1-4, 20, 42], а также на сайте: <http://www.szma.com>.

К данному верификационному отчету прилагаются описаний расчетных и аналитических Тестов (приложение 1) и Контрольных примеров (приложение 2). В этих описаниях приводятся сопоставления аттестуемого ПК "ПК АСМ СЗМА" с аттестованными ПК "Risk Spectrum" и "CRISS 4.0".

В Инструкции пользователя ПК АСМ СЗМА (приложение 3) содержится информация, необходимая для самостоятельного практического применения заявленной к аттестации базовой версии ПК АСМ СЗМА.

Важные дополнительные сведения о результатах сравнительного анализа ПК АСМ СЗМА с аттестованным ПК Risk Spectrum (Швеция) и широко используемым ПК Relex (США), приведены в тексте НИР "Технология 2004" [20], выполненной совместно СПБАЭП, ИПУ РАН и ОАО "СПИК СЗМА" (см. приложение 4).

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ПК АСМ СЗМА

Программный комплекс ПК АСМ СЗМА **предназначен** для выполнения работ по автоматизированному математическому (логическому и вероятностному) моделированию и расчету вероятностных характеристик структурной надежности (безотказности, отказа, частичного отказа и др. [64]) и безопасности (технического риска [34] возникновения или невозникновения аварийных ситуаций и аварий, с последствиями определенного уровня или класса, вследствие отказов элементов по причинам их ненадежности) различных структурно-сложных системных объектов, в том числе:

- надежности и/или безопасности **объектов использования атомной энергии** различных категорий и назначения, например: систем безопасности и ядерной установки, комплексов, установок, аппаратов и оборудования, в которых содержатся радиоактивные вещества; объектов и сооружений, предназначенных для хранения ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов [15, 16, 17, 19, 35];
- надежности и/или безопасности систем, входящих в состав различных **опасных производственных объектов**, например, нефтехимической и газовой промышленности [18, 43-54];
- надежности **технических объектов** различных видов, классов и назначения, безотказность или отказы которых представляются с помощью аппарата СФЦ.

ПК АСМ СЗМА реализует следующие основные функции.

1. Ввод структурных моделей свойств надежности и/или безопасности исследуемых системных объектов, представленных в виде одноуровневых и двухуровневых (декомпозированных) *схем функциональной целостности* (СФЦ). С помощью СФЦ могут представляться следующие виды монотонных типовых структур свойств надежности и безопасности систем:
 - *блок-схемы* систем (структуры без циклов);
 - *графы связности* (структуры с циклами);
 - *деревья отказов*;
 - *деревья событий*.
2. Кроме традиционных монотонных моделей, с помощью СФЦ может представляться новый класс немонотонных моделей исследуемых систем. Немонотонные модели в ПК АСМ СЗМА формируются или помощью СФЦ с инверсными связями, или с помощью немонотонных логических критериев функционирования.
3. Монотонные модели реализуются в ПК АСМ СЗМА на основе монотонных СФЦ и могут представляться в двух формах. Прямые модели формируются на

основе монотонных СФЦ и прямых монотонных ЛКФ. Обратные модели формируются на основе монотонных СФЦ и инверсных ЛКФ. При этом, в зависимости от постановки задачи, и прямые и обратные модели могут равноценно представлять как условия безотказности и/или безаварийности исследуемой системы, так и условия ее отказа или возникновения аварии.

4. С помощью базовой версии ПК АСМ СЗМА исследуются два основных класса свойств систем:
 - **надежность** - включают свойства и показатели "безотказности" и "ремонтоспособности" системного объекта, определенные согласно ГОСТ 27.002-89;
 - **безопасность** – включает свойство возникновения или невозникновения аварийных ситуаций и аварий системного объекта с последствиями определенного уровня, вследствие отказов его технических устройств (элементов), показатели которого определяется соответствующими методами теории надежности (в [34] это свойство названо "технический риск").
5. В режиме "Статические расчеты" ПК АСМ СЗМА выполняет (на основе многочлена ВФ) вычисление точных значений вероятности реализации системного события, соответствующего заданным СФЦ и ЛКФ системы. Статические расчеты производятся на основе непосредственно задаваемых вероятностей элементарных событий (элементов), независимых от времени.
6. В режиме "Вероятностно-временные расчеты" ПК АСМ СЗМА выполняет вычисление точных (на основе многочлена ВФ) значений следующих системных характеристик:

Для **невосстанавливаемой** системы -

- **вероятность безотказной работы элементов**;
- **вероятность безотказной работы системы**;
- **среднюю наработку до отказа системы**;

Для **восстанавливаемой** системы -

- **коэффициент готовности элемента**;
- **коэффициент готовности системы**;

- *среднюю наработку на отказ системы;*
 - *среднее время восстановления системы;*
 - *вероятность безотказной работы (отказа)* восстанавливаемой системы.
- Вероятностно-временные расчеты производятся на основе задаваемых параметров элементов - средней наработки до отказа, среднего времени восстановления, и общего времени работы (наработки) системы в целом.
7. Важным частным случаем является моделирование и расчет надежности и/или безопасности так называемых смешанных систем, состоящих из невосстанавливаемых и восстанавливаемых элементов. Для смешанных систем ПК АСМ СЗМА вычисляет общесистемный показатель, названный - "*вероятность готовности смешанной системы*".
8. В режиме "Вероятностно-временные расчеты" при включении признака "Учет времени работы элементов", при расчетах вероятностно-временных характеристик в ПК АСМ СЗМА производится автоматический учет заданных параметров собственного времени работы отдельных элементов (если оно меньше, чем заданная общая наработка системы).
9. В режимах "Статические расчеты", "Вероятностно-временные расчеты" и включенном параметре моделирования "Признак полных вычислений", ПК АСМ СЗМА рассчитывает, по методикам, разработанным в ОЛВМ [5, 29], значения следующих дополнительных показателей роли элементов в системе:
- *значимости элементов;*
 - *положительных вкладов элементов;*
 - *отрицательных вкладов элементов;*
10. В режиме "Приближенные расчеты", "Отсечка/Нет" и отключенном признаке "Учет типов отказов", ПК АСМ СЗМА выполняет расчеты, по методикам, аналогичным ПС Risk Spectrum [24, 25] и Sapphire-7 [70] для независимых отказов элементов. Вычисляются приближенные значения следующих показателей:
- *вероятности элементарных (базисных) событий;*

- *вероятности конъюнкций ФРС* (КПУФ, МСО и их немонотонных комбинаций);
- *вероятности реализации критерия* (вершинного события ДО);
- *значимости конъюнкций ФРС по Fussell-Vesely* [70];
- *суммарной значимости конъюнкций ФРС по Fussell-Vesely* [70];
- *значимости элементов (базисных событий) по Fussell-Vesely* [69];
- *коэффициент уменьшения риска элементов (базисных событий) по Fussell-Vesely* [69];
- *коэффициент увеличения риска элементов (базисных событий) по Fussell-Vesely* [69];
- *число вхождений базисных событий в конъюнкции* (КПУФ, МСО и их немонотонные комбинации).

11. В режиме "Приближенные расчеты", "Отсечка/Нет" и включенном признаке "Учет типов отказов", ПК АСМ СЗМА вычисляет приближенные значения тех же показателей, что указаны п.10, но расчеты производятся по методикам, реализованным в ПС "CRISS 4.0" [69]. При выполнении этих расчетов учитывается влияние на значения системных показателей трех моделей отказов элементов (базисных событий) – *отказ на требование, отказ в режиме работы и скрытый отказ в режиме ожидания*;
12. В режиме "Приближенные расчеты" и включенном признаке "Отсечка/Меньше/1E-6", в ПК АСМ СЗМА выполняет построение усеченной логической ФРС с групповым отбрасыванием конъюнкций (КПУФ, МСО или их комбинаций), вероятности которых меньше заданного значения вероятностного критерия отсечки (по умолчанию устанавливается значение "1E-6"). Далее выполняются вычисления показателей, перечисленных в п.10 и п.11.
13. При наличии в СФЦ исследуемой системы групп несовместных событий [40] они автоматически учитываются при построении логических, вероятностных моделей и выполнении расчетов.

14. Отдельные функциональные вершины СФЦ могут представлять *кратные элементы* исследуемой системы. Кратные элементы бывают двух видов:
- *конъюнктивные*, представляют подсистему из заданного числа, последовательного соединенных однородных элементов;
 - *дизъюнктивные*, представляют подсистему, состоящую из заданного числа параллельно соединенных однородных элементов.
15. ПК АСМ СЗМА допускает использование в СФЦ неограниченного числа так называемых *размноженных вершин* (функциональных), имеющих одинаковые номера и наименования. Размноженные вершины используются для представления в разных местах СФЦ одних и тех же элементов (базисных событий) исследуемой системы.
16. В Комплексе реализованы два способа представления комбинаторных подсистем K/N (не менее K из N). Первый способ универсальный и основывается на представлении комбинаторных отношений непосредственно с помощью графических средств СФЦ. Второй способ предполагает использование двух вспомогательных комбинаторных утилит вычисления вероятностных характеристик однородных (утилита метода агрегирования) и неоднородных (утилита метода формирования комбинаций) односвязных комбинаторных подсистем большой размерности.
17. Реализованы два способа учета отказов по общей причине групп элементов для трех типовых моделей "альфа-фактора", "бета-фактора" и "множественных греческих букв". Первый способ основывается на предварительном структурном представлении средствами СФЦ деревьев отказов ООП и вычислении соответствующих вероятностных параметров с помощью вспомогательной утилиты "Расчет вероятностей отказов по общей причине". Второй способ реализует автоматический (без ручного построения СФЦ дерева отказов ООП) учет указанных трех типовых моделей отказов групп элементов по общей причине.
18. Для моделирования и расчетов показателей надежности и безопасности структурно-сложных систем большой размерности в ПК АСМ СЗМА реализована

возможность односвязной двухуровневой структурной декомпозиции СФЦ [5]. Декомпозиция основывается на выделении в исследуемой системе структурных фрагментов (подсистем) обладающих свойствами односвязности ОЛВМ [5]. Односвязные подсистемы могут представляться соответствующими эквивалентными СФЦ второго уровня декомпозиции. Выделенные подсистемы обозначаются в СФЦ первого уровня эквивалентированными вершинами (в виде треугольников). Декомпозиция обеспечивает экспоненциальное сокращение размеров формируемых логических и вероятностных математических моделей надежности и безопасности исследуемых систем и общего времени их анализа, без потери точности вычислений основных вероятностных общесистемных характеристик.

19. Результаты автоматизированного моделирования (ФРС, ВФ) и расчетов перечисленных выше вероятностных показателей выводятся ПК АСМ СЗМА на экран дисплея и сохраняются в файле результатов rezasm.lst для последующего их использования при выработке и обосновании решений в области обеспечения надежности и безопасности исследуемых систем.

Корректность реализации в ПК АСМ СЗМА всех, перечисленных выше основных функций (в тексте выделены), подтверждена решениями Тестовых задач (см. приложение 1) и Контрольных примеров (см. приложение 2). Их общее сопоставление отражено в Матрице верификации ПК АСМ СЗМА (см. §1.4).

Главными отличительными признаками ПК АСМ СЗМА, в сравнении с известными теориями, технологиями и программными средствами автоматизированного моделирования и расчета структурной надежности и безопасности систем [21-25, 66, 55, 56, 58, 59], являются:

- **ПК АСМ СЗМА основывается** на новой теории и технологии *автоматизированного структурно-логического моделирования* (АСМ) [6, 7, 26], научной базой которых выступает *общий логико-вероятностный метод* (ОЛВМ), впервые реализующий все возможности основного аппарата моделирования -

алгебры логики, в функционально-полном базисе операций *"И"*, *"ИЛИ"* и *"НЕ"*;

- **ПК АСМ СЗМА реализует общий логико-вероятностный метод** и его принципиально новый и логически полный графический аппарат описания структур систем - *схем функциональной целостности* (СФЦ) [5, 26, 29];
- **ПК АСМ СЗМА позволяет:**
 - представлять с помощью СФЦ все виды логически строгих **типовых структурных схем**, используемых в других технологиях и программных средствах моделирования надежности и безопасности систем (блок-схем, графов связности, деревьев отказов и деревьев событий);
 - строить принципиально новый класс *немонотонных структурных моделей* надежности и безопасности сложных системных объектов и процессов различного назначения;
 - учитывать в структурных моделях исследуемых системах реально существующих множественных *циклических (мостиковых) связей и отношений* между элементами и подсистемами;
 - учитывать реально существующие зависимости элементов (базисных событий), представляемых с помощью аппарата *групп несовместных событий* (ГНС) (стохастические зависимости полных и частичных ГНС, наличие в системе элементов с произвольным (больше двух) числом собственных состояний и др.);
- **Основные функции ПК АСМ СЗМА ориентированы** на автоматическое построение точных (в рамках принятых ограничений и допущений) логических и вероятностных математических моделей и выполнение расчетов вероятностных показателей систем, свойства надежности и безопасности которых структурно представляются с помощью аппарата схем функциональной целостности общего логико-вероятностного метода системного анализа [5].

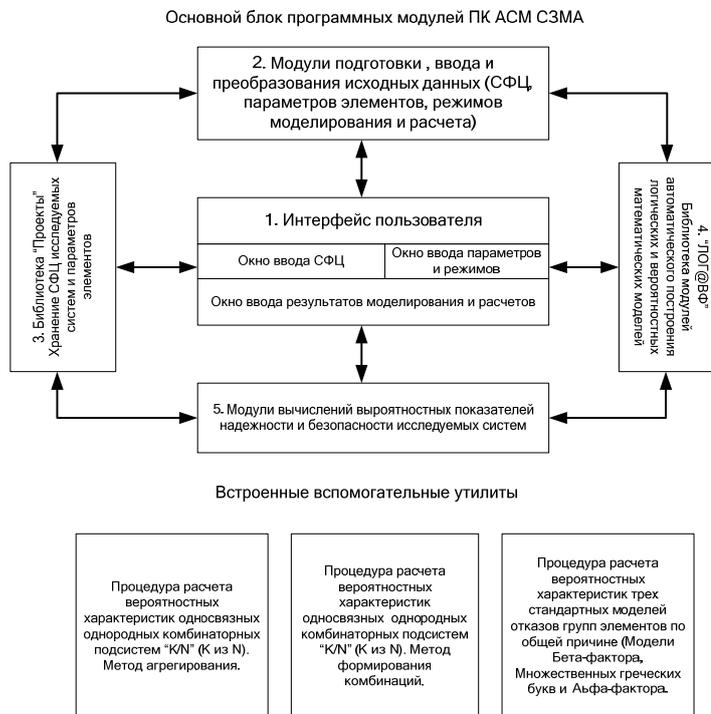
- В Комплексе реализованы **дополнительные функции** автоматического моделирования и расчетов приближенных вероятностных характеристик надежности и безопасности систем, по типовым методикам, используемым в аттестованных ПС "Risk Spectrum" и "CRISS 4.0".

ПК АСМ СЗМА может использоваться для **подготовки документов** (расчетно-пояснительных записок) обоснования надежности и безопасности ОПО и ОИАЭ, деклараций промышленной безопасности и разработке планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций, представляемых в Ростехнадзор России [4, 18, 19, 35, 41].

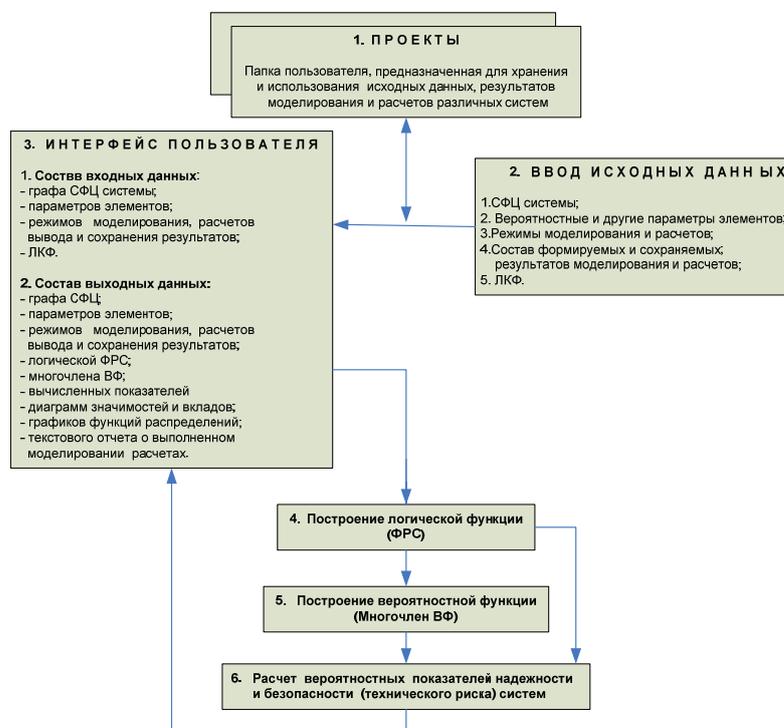
Комплекс представляется к аттестации как **средство инженерных расчетов** вероятностных показателей надежности (безотказность, восстанавливаемость) и безопасности (технического риска) различных структурно-сложных систем ОИАЭ и других ОПО. Он относится к типу ПС, реализующих технологию автоматизированного структурно-логического моделирования и вероятностного анализа структурно-сложных систем.

1.2. БЛОК-СХЕМА ПК АСМ СЗМА

Укрупненная блок-схема (функциональная структура и логическая структура) программы ПК АСМ СЗМА приведена на Рис. 1.



а. Функциональная структурная схема ПК АСМ СЗМА



б. Логическая структурная схема ПК АСМ СЗМА

На Рис. 1.а в основном блоке выделено пять групп программных модулей, которые в совокупности реализуют основные функции представленной к аттестации базовой версии ПК АСМ СЗМА.

1.2.1. Интерфейс пользователя

На Рис. 2 изображен вид основного окна интерфейса пользователя ПК АСМ СЗМА.

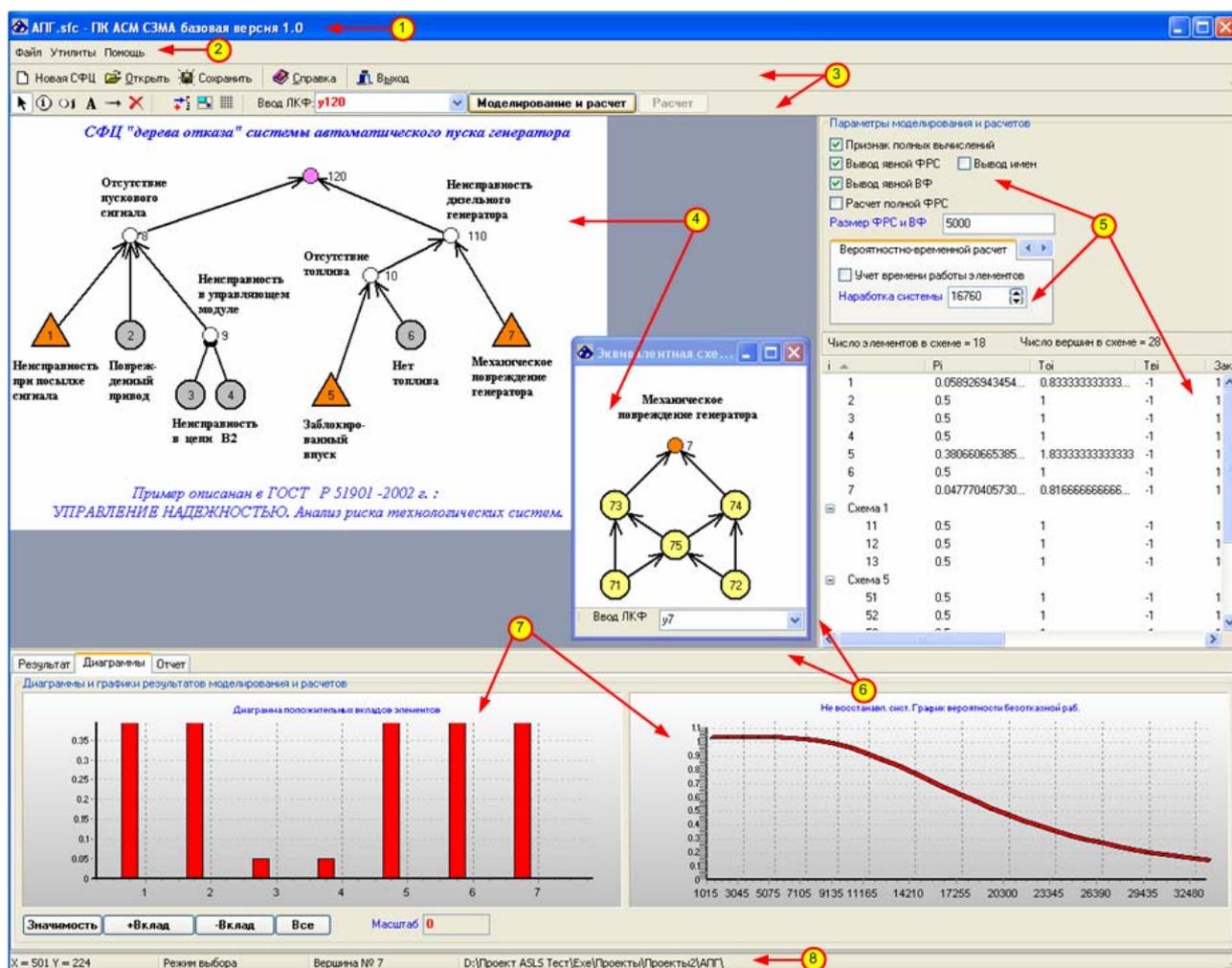


Рис. 2. Основное окно интерфейса пользователя ПК АСМ СЗМА

Интерфейс (см. Рис. 1.а, блок 1 и Рис. 1.б, блок 3) предназначен для обеспечения удобной работы пользователя ПК АСМ СЗМА по автоматизированному моделированию и расчету надежности и безопасности исследуемых систем.

Основные компоненты окна интерфейса пользователя:

1. Панель заголовка;
2. Панель главного меню;
3. Панели инструментов с кнопками быстрого доступа, которые дублируют часть пунктов главного меню;
4. Окно графического ввода новых, а также открытие ранее разработанных СФЦ, их редактирование и сохранение в папке "Проекты";
5. Окно ввода параметров моделирования и расчетов;
6. Перемещаемые разделительные полосы управления видимыми размерами основных окон;
7. Окно вывода на экран результатов моделирования и расчетов, содержащее три страницы: "Результаты", "Диаграммы" и "Отчет" (отображение файла результатов rezasm.lst);
8. Статусная строка Комплекса.

С помощью элементов управления интерфейса пользователь ПК АСМ СЗМА может реализовать следующие функции:

- Графический ввод структурной модели (см. Рис. 2, п.4) надежности и/или безопасности системы (блок-схемы, графа связности, дерева отказов, дерева событий и др.), представленной в виде схемы функциональной целостности, и выполнять типовые функции ее редактирования (ввод и удаление вершин и ребер, перетаскивание и перенумерацию узлов, декомпозицию СФЦ, ввод заголовков, наименований, пояснительных текстов и ряд др.);
- Ввод исходных значений вероятностных и других параметров (см. Рис. 2, п.5) элементов, задание режимов ("Статический расчет", "Вероятностно-временной расчет" и "Приближенный расчет") автоматизированного моделирования и расчетов показателей надежности и безопасности систем, представленных СФЦ.
- с помощью кнопок "Моделирование и расчет" (см. Рис. 2, п.3) пользователь запускает автоматическое моделирование и расчет.

1.2.2. Модули подготовки, ввода и преобразования исходных данных

Программные модули блока 2 Рис. 1 обеспечивают реализацию функций интерфейса пользователя и информационную взаимосвязь с другими модулями Комплекса. Средства управления модулями блока 2 размещаются в ПК АСМ СЗМА на панелях инструментов интерфейса пользователя (см. Рис. 2 п.3).

Этот блок обеспечивает действия оператора, связанные с подготовкой к моделированию и расчетам на ПК АСМ СЗМА. Они включают в себя ввод в ПК АСМ СЗМА следующих признаков, режимов работы и исходных данных:

- СФЦ исследуемой системы и всех ее декомпозированных подсистем;
- Логического критерия функционирования системы;
- Режим "Статический расчет";
- Режим "Вероятностно-временной расчет";
- Режим "Приближенный расчет";
- "Признака полных вычислений";
- Признака "Расчет полной ФРС";
- Параметра "Отсечка" (Нет/Меньше, с установкой вероятностного критерия отсечки);
- Параметра "Наработка системы" (задается в часах);
- Признака "Учет времени работы элементов" (значения задаются в таблице параметров в часах);
- Признака "Вывод явной ФРС" в файл результатов "rezasm.lst";
- Признака "Вывод имен", при включении которого ФРС выводится в файл rezasm.lst с использованием кодовых обозначениях имен элементов;
- Признака "Вывод явной ВФ" в файл результатов "rezasm.lst";
- Параметра "Размер ФРС и ВФ" (максимальное число конъюнкций и одно-членов);

В таблице параметров элементов вводятся:

- Статические вероятности элементарных событий;
- Средние наработки до отказа элементов (в годах);

- Среднее время восстановления элементов (в часах);
- Признаки учета групп несовместных событий;
- Кодов законов распределений времени безотказной работы и типов отказов элементов;
- Параметры кратности элементов;
- Описания или кодовые обозначения элементарных (базисных) событий.

После первичного ввода исходных данных все их значения сохраняются в рабочих файлах СФЦ и автоматически подгружаются при каждом новом открытии проекта.

1.2.3. Библиотека модулей "ЛОГ&ВФ"

Модули блока 3, Рис. 1.а (блоки 4, 5, Рис. 1.б) представляют **библиотеку "ЛОГ&ВФ"** [27] (LOG_WF.bpl) программ автоматического построения математических моделей, используемых для детерминированного и вероятностного анализа надежности, безопасности исследуемых систем. К модулям ЛОГ&ВФ предъявляются требования точности построения математических моделей, быстродействия и минимизации форм представления логических и вероятностных функций в памяти ЭВМ. ЛОГ&ВФ автоматически учитывает в формируемых моделях кратные и размноженные вершины СФЦ, а также признаки групп несовместных событий.

При работе ПК АСМ СЗМА в режиме "Приближенные расчеты" и установки значения критерия отсечки, ЛОГ&ВФ автоматически формирует (усеченные) логические функции надежности и безопасности систем.

1.2.4. Модули вычислений вероятностных характеристик

Программные модули блока 4, Рис. 1.а (блока 6, Рис. 1.б) предназначены для выполнения расчетов вероятностных показателей функциональных событий, представляющих свойства надежности и безопасности исследуемой системы. Точные расчеты производятся в режимах "Статический расчет" и "Вероятностно-временной расчет" на основе автоматически сформированного в ПК АСМ СЗМА

точного многочлена вероятностной функции. При включении режима "Приближенный расчет", а также в случае невозможности построения точной вероятностной функции, в ПК АСМ СЗМА выполняются приближенные вычисления вероятностных характеристик по известным методикам [69, 70].

1.2.5. Библиотека "Проекты"

Блок 5 Рис. 1.а (блок 1 Рис. 1.б) ПК АСМ СЗМА представляет рабочую папку "Проекты" пользователя, в которой хранятся данные о разработанных и разрабатываемых проектах, примерах и задачах моделирования и расчета надежности и безопасности систем. На любом этапе работы по вводу, корректировке исходных данных и просмотра результатов, пользователь может "Открыть", "Сохранить" или "Сохранить как.." новую СФЦ с помощью соответствующих пунктов главного меню ПК АСМ СЗМА. При сохранении данных можно воспользоваться текущей открытой папкой выполняемого проекта или задать новое имя сохраняемому проекту. В этом случае автоматически формируется соответствующая новая папка проекта, в которой сохраняются:

- Основной файл, с расширением ".sfc", и дополнительный файл, с расширением ".ctg", суперграфа основной СФЦ, параметров ее элементов и пояснительных текстов;
- Файлы с расширением ".sbg" подграфов СФЦ декомпозированных подсистем, параметров их элементов и пояснительных текстов;
- Файл "rezasm.lst" отчета о результатах последнего сеанса моделирования и расчета вероятностных показателей данной системы.

При открытии ранее разработанного проекта (пункт главного меню "Файл.Открыть...") выполняется загрузка в ПК АСМ СЗМА всех данных последнего сохраненного сеанса моделирования и расчетов этого проекта (СФЦ, параметры элементов, ЛКФ, параметры и режимы моделирования и расчетов).

1.2.6. Утилита расчета вероятностных характеристик односвязных комбинаторных подсистем K из N методом агрегирования

Данная утилита (см. Рис. 1.а) предназначена для расчета типовых вероятностных характеристик надежности (безотказности) однородной комбинаторной подсистемы K/N (K из N), состоящей из N однотипных элементов. На Рис. 3 изображено диалоговое окно этой вспомогательной утилиты.

Рис. 3. Диалоговое окно утилиты расчетов характеристик K из N методом агрегирования.

Исходными данными для расчета являются:

1. N – общее число элементов комбинаторной подсистемы;
2. K – число элементов из N , безотказность или отказ которых определяют безотказность или отказ всей комбинаторной подсистемы;
3. **Вероятностные параметры надежности элементов** однородной (все элементы имеют одинаковые параметры надежности) комбинаторной группы, которые могут быть трех видов:

- статическая вероятность p_i ;
 - средняя наработка до отказа T_{O_i} элемента в годах и наработка t невозстанавливаемой комбинаторной системы в часах;
 - средняя наработка до отказа T_{O_i} элемента в годах, среднее время восстановления T_{B_i} элемента в часах и наработка t восстанавливаемой комбинаторной системы в часах.
4. Если признак "**ИНВЕРСИЯ**" выключен, то выполняются вычисления прямых (безотказность, отказ), а если включен – обратных (отказ, безотказность) вероятностных характеристик исследуемой комбинаторной подсистемы.

Показатели, вычисляемые с помощью утилиты агрегирования:

1. **РKN** – статическая вероятность, вероятность безотказной работы или отказа, коэффициент готовности или неготовности не менее **K** элементов из **N** комбинаторной подсистемы;
2. **ToKN** - средняя наработка до отказа или средняя наработка на отказ;
3. **TbKN** - среднее время восстановления;
4. Значимости **ZNi**, положительные **Vpi** и отрицательные **Vmi** вклады элементов.

Указанные характеристики вычисляются утилитой для двух случаев:

1. **не менее K из N** (результаты выводятся на зеленые поля);
2. **ровно K из N** (результаты выводятся на желтые поля рабочей панели).

В нижней части рабочей панели (см. Рис. 3) размещены окна вывода результатов контрольных приближенных расчетов, которые выполняются утилитой агрегирования по формулам и методикам, описанным в технической документации ПК Risk Spectrum [24]. На Рис. 3 приведены результаты статических расчетов утилитой агрегирования вероятности $P_{K/N}$ комбинаторной подсистемы 3/4 (элементы А, В, С, и D) примера, описанного в документации на ПК Risk Spectrum [24, стр.40]. При $P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = p_i = 0.01$ с помощью утилиты агрегирования ПК АСМ СЗМА получены следующие значения $P_{K/N}$.

$$P_{K/N} = 3.97E - 6 \text{ (точное значение).}$$

Приближенные значения, полученные по методике ПК Risk Spectrum:

$$P_{K/N}(TOP1) = 4E - 6 \text{ (аппроксимация 1-го порядка);}$$

$$P_{K/N}(TOP2) = 3.94E - 6 \text{ (аппроксимация 2-го порядка);}$$

$$P_{K/N}(TOP3) = 3.98E - 6 \text{ (аппроксимация 3-го порядка);}$$

$$P_{K/N}(MIN TOP) = 3.99999400000408E - 6 \text{ (мин. верхняя граница сечения).}$$

Все эти результаты полностью совпадают с данными, приведенными в [24]. Однако погрешности приближенных вычислений в ПК Risk Spectrum могут быть существенными. Сами авторы [24] отмечают: " Это плохо, но это - не признак ошибки в алгоритме Risk Spectrum; это - свойство данного метода".

Таким образом, расчетная утилита агрегирования позволяет выполнять как точные, так и контрольные приближенные (по методике Risk Spectrum [24]) вычисления прямых и обратных вероятностных характеристик высокоразмерных (до $N=30$) односвязных однородных комбинаторных подсистем **во всем диапазоне значений** вероятностных параметров элементов $0 \leq p_i \leq 1$.

1.2.7. Утилита расчета вероятностных характеристик односвязных комбинаторных подсистем K из N методом формирования комбинаций

На Рис. 4 изображено диалоговое окно данной утилиты ПК АСМ СЗМА.

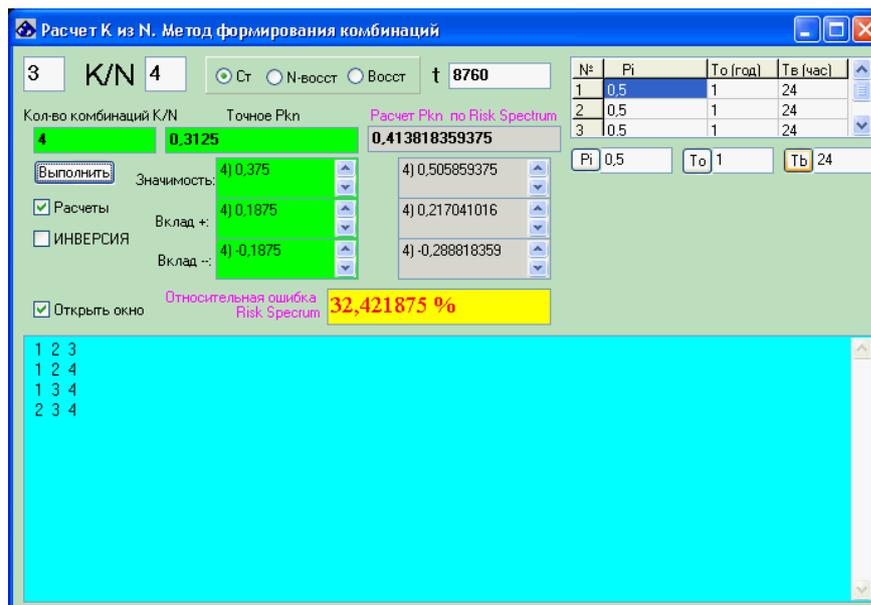


Рис. 4. Диалоговое окно параметров расчета K из N методом формирования комбинаций

Процедура расчета K из N методом формирования комбинаций предназначена для расчета типовых вероятностных характеристик **неоднородной комбинаторной подсистемы** K/N (K из N), состоящей из N однотипных или **разнотипных** элементов (с различными собственными параметрами надежности).

Исходными данными для расчета являются:

1. N – общее число элементов комбинаторной подсистемы;
2. K – число элементов из N , безотказность или отказ которых определяют безотказность или отказ всей комбинаторной подсистемы;
3. **вероятностные параметры** надежности каждого из элементов $i = 1, 2, 3, \dots, N$ неоднородной комбинаторной подсистемы, которые могут быть трех видов:
 - статическая вероятность p_i ;
 - средняя наработка до отказа T_{O_i} элемента в годах и наработка t восстанавливаемой комбинаторной системы в часах;
 - средняя наработка до отказа T_{O_i} элемента в годах, среднее время восстановления T_{B_i} элемента в часах и наработка t восстанавливаемой комбинаторной системы в часах.
4. признак "**ИНВЕРСИЯ**", при отсутствии которого устанавливается режим моделирования и вычисления прямых (безотказность, отказ), а при наличии которого – обратных (отказ, безотказность) вычислений вероятностных характеристик исследуемой комбинаторной подсистемы.

После ввода указанных исходных данных и нажатия кнопки "**Выполнить**" утилита осуществляет автоматическое построение всех прямых или инверсных комбинаторных комбинаций K/N , производит расчеты и выводит на рабочую панель значения следующих вероятностных характеристик исследуемой комбинаторной подсистемы (см. Рис. 4):

- **количество комбинаций** K/N в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (КПУФ, МСО или их комбинации);
- точная вероятность **P_{kn}** безотказности или отказа не менее K элементов из N (статическая вероятность, вероятность безотказной работы восстанавли-

ваемой и коэффициент готовности восстанавливаемой комбинаторной системы);

- контрольный приближенный расчет P_{kn} по методике вычисления, реализованной в ПК Risk Spectrum "минимальной верхней границы сечения" [24];
- Значения соответствующих **значимостей и вкладов** каждого элемента неоднородной комбинаторной системы;
- **среднюю наработку до отказа** невосстанавливаемой комбинаторной системы;
- **среднюю наработку на отказ, среднее время восстановления и вероятность отказа** восстанавливаемой комбинаторной системы;

При включении признака "**Открыть окно**" на экран выводятся все формируемые утилитой прямые или инверсные комбинации K/N исследуемой комбинаторной системы.

На Рис. 4 приведены результаты статических расчетов утилитой формирования комбинаций ПК АСМ СЗМА еще одного примера из технической документации на ПК Risk Spectrum [24, стр.40]. Здесь вычислена вероятность $P_{3/4}$ для значений $P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = p_i = 0.5$ элементов однородной комбинаторной подсистемы 3/4. В этом случае (см. Рис. 3) результаты составили:

- точный результат $P_{K/N} = 0.3125$;
- приближенный результат $P_{(MIN_TOP)} = 0.4138$ (мин. верх. граница сечения);

Значения этих вероятностей полностью совпадают с данными, приведенными в [24].

Таким образом, утилита формирования комбинаций позволяет находить точные и приближенные (по методике Risk Spectrum) значения характеристик высокоразмерных однородных и неоднородных комбинаторных подсистем (до $N=20$) во всем диапазоне значений вероятностных параметров ее элементов $0 \leq p_i \leq 1$.

1.2.8. Утилита расчета вероятностей базовых событий групп элементов, отказывающихся по общей причине

Данная утилита (см. Рис. 1.а) предназначена для расчета вероятностных параметров базовых событий одиночных и групповых отказов элементов по общей причине для трех типовых моделей:

- Бета-фактора;
- Множественных греческих букв;
- Альфа-фактора;

На Рис. 5 приведены результаты расчета вероятностей одиночных и парного отказов группы из двух элементов по общей причине для типовой модели Альфа-фактора.

Расчет вероятностей отказов по общей причине

Множественные греческие буквы | **Альфа-Фактор** | Бета-Фактор

Число элементов группы ООП n= 2

Полная вероятность отказа одного элемента группы ООП Qtot= 0.5

Альфа-параметры группы ООП

α_1	α_2
0.95	0.05

Фактор 1.05

Вычислить

Вероятности Q_k базовых событий ООП :

k	$N_k=k/n$	Q_k
1	2	0.452380952380952
2	1	0.0476190476190476

Рис. 5. Диалоговое окно утилиты расчета параметров типовых моделей ООП

Все расчеты в данной утилите выполняются на основе математических моделей ООП, приведенных в документации на ПК Risk Spectrum (см. [24], формулы 42-58) и ПК Relex (см. [66], стр.5.28 -5.30).

1.3. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПК АСМ СЗМА

1. Вероятностно-временные показатели надежности и/или безопасности систем (средние наработки) рассчитываются только для **прямых монотонных логико-вероятностных моделей** исследуемых объектов.
2. При выполнении расчетов вероятностно-временных показателей надежности и/или безопасности исследуемых систем используется **экспоненциальный закон** распределения времени безотказной работы и восстановления всех элементов.
3. В режимах "Статический расчет" и "Вероятностно-временной расчет" исследуются системы, для которых приемлемой является гипотеза о **независимости в совокупности** отказов (поражений) всех элементов и **неограниченности** их восстановлений.
4. В автоматически формируемых математических моделях и при выполнении расчетов могут учитываться ряд стохастических зависимостей элементов, которые представляются с помощью аппарата **групп несовместных событий** ОЛВМ [40].
5. Реализована **двухуровневая декомпозиция** структур надежности и безопасности исследуемых системных объектов;
6. Допускается **размножение функциональных вершин СФЦ** только внутри основной и декомпозированных подсистем. Размножение фиктивных, эквивалентированных вершин и функциональных вершин, входящих в разные декомпозированные подсистемы, не допускается.
7. Размноженные функциональные вершины не могут входить в **группы несовместных событий СФЦ**.
8. В ПК АСМ СЗМА реализованы **структурный и автоматизированный способы** учета отказов групп элементов по общей причине (ООП). Структурный способ основывается на построении непосредственно в СФЦ деревьев отка-

зов ООП, размерностью **до 4 элементов** в группе. Для вычисления параметров базовых событий структурного способа учета ООП может использоваться вспомогательная расчетная утилита, охватывающая три типовые модели: бета-фактора, множественных греческих букв и альфа-фактора. При автоматизированном способе, деревья ООП в СФЦ не строятся. Задаются только параметры групп ООП для трех указанных типовых моделей. При этом размерность групп при автоматизированном учете ООП возрастает **до 8 элементов** включительно.

9. Логическая полнота аппарата СФЦ позволяет в ПК АСМ СЗМА реализовывать различные **нетиповые методы** структурного учета отказов по общим причинам.
10. Непосредственно в основном блоке ПК АСМ СЗМА реализованы **структурные способы** учета комбинаторных переборов K/N (K из $N \leq 8$).
11. Высокоразмерные ($N > 8$) односвязные однородные и неоднородные подсистемы K/N могут представляться в СФЦ отдельными функциональными вершинами, вероятностные параметры которых вычисляются заблаговременно с помощью соответствующих **вспомогательных расчетных утилит** агрегирования ($N \leq 30$) или формирования комбинаций ($N \leq 20$).
12. В режиме "Приближенный расчет" с включенным признаком "Отсечка" исследуются только монотонные системы, для которых:
 - приемлемыми являются гипотеза о **независимости в совокупности** отказов (поражений) всех элементов и методики расчета показателей, используемые в ПК Sapphire-7 [70] и Risk Spectrum [23, 24];
 - приемлемыми являются методы и методики расчетов приближенных показателей, используемые в аттестованном ПК "CRISS 4.0" [69] (учет трех типов отказов элементов – отказ на требование, отказ в режиме работы и скрытый отказ в режиме ожидания);

13. Если установленного значения параметра "Размер ФРС и ВФ" оказалось недостаточно для построения логической модели (ФРС), то выдается соответствующее сообщение и решение задачи приостанавливается. Тогда пользователю необходимо самостоятельно принять меры для сокращения размерности логической модели исследуемой системы (увеличить значение параметра "Размер ФРС и ВФ", декомпонировать СФЦ, использовать кратные вершины или признак "Отсечка").
14. Если установленного значения параметра "Размер ФРС и ВФ" оказалось достаточно для построения логической ФРС, но недостаточно для построения точного многочлена ВФ, то выдается соответствующее сообщение, и выполняются типовые расчеты приближенных значений вероятностных характеристик системы на основе только логической ФРС.
15. Включение параметра моделирования и расчета "Расчет полной ФРС" допускается только для декомпонированных прямых монотонных задач.
16. При анализе ядерно и радиационно-опасных объектов с помощью базовой версии ПК АСМ СЗМА нельзя проводить статистическую оценку неопределенности, и автоматизированную оценку чувствительности с использованием коэффициентов варьирования.

Допустимые значения параметров ПК АСМ СЗМА

Таблица 1

1	Логические операторы СФЦ	–	"И", "ИЛИ", "НЕ";
2	Вершины СФЦ	–	функциональные, фиктивные, эквивалентированные;
3	Нумерация вершин	–	от 1 до 999 в основной и каждой декомпонированной СФЦ
4	Дуги СФЦ	–	конъюнктивные прямые, конъюнктивные инверсные, дизъюнктивные прямые, дизъюнктивные инверсные;
5	Число уровней декомпозиции	–	2
6	Число вершин основной схемы функциональной целостности	–	до 400
7	Число вершин декомпонированных подсистем	–	до 100

8	Значения вероятностей элементарных событий	—	от 0.0 до 1.0 включительно
9	Связанные события в одной группе ООП, представляемой средствами СФЦ	—	до 4
10	Связанные события в одной группе при автоматическом учете ООП	—	до 8
10	Число N комбинаторной подсистемы, представляемой средствами СФЦ	—	до 8
11	Число N однородной комбинаторной подсистемы, обрабатываемой утилитой агрегирования	—	до 30
12	Число N неоднородной комбинаторной подсистемы обрабатываемой утилитой формирования комбинаций	—	до 20

Построение монотонной логической модели	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Построение немонотонной логической модели	+	+		+		+										
Построение прямой логической модели	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Построение обратной логической модели	+	+	+		+	+		+		+	+	+				
Построение многочлена расчетной вероятностной функции	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+						
Моделирование и расчет надежности	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Моделирование и расчет безопасности	+			+	+							+	+	+	+	+
Расчет статической вероятности реализации критерия		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
Расчет вероятности безотказной работы (отказа) невосстанавливаемой системы	+	+							+	+	+					
Расчет средней наработка до отказа невосстанавливаемой системы	+	+							+		+					
Анализ восстанавливаемой системы		+	+						+							
Расчет коэффициента готовности		+	+						+							
Расчет средней наработки на отказ восстанавливаемой системы		+	+						+							
Расчет среднего времени восстановления системы		+	+						+							
Расчет вероятности безотказной работы (отказа) восстанавливаемой системы		+	+						+							
Моделирование и расчет вероятности готовности смешанной системы			+						+							
Расчет значимостей и вкладов элементов	+	+							+							

по методике ОЛВМ															
Учет групп несовместных событий (ГНС)				+			+								
Учет кратности элементов	+			+					+						
Учет размноженных вершин			+						+		+	+	+	+	+
Структурный учет комбинаторных связей элементов и/или автономных комбинаторных подсистем			+				+						+	+	
Использование утилиты агрегирования для расчета показателей надежности комбинаторных подсистем				+			+								
Использование утилиты формирования комбинаций для расчета показателей надежности комбинаторных подсистем							+								
Учет собственного времени работы эл-ов	+														
Структурный учет отказов групп элементов по общей причине				+		+	+								
Автоматический учет отказов групп элементов по общей причине						+									
Односвязная двухуровневая структурная декомпозиция.	+			+			+		+	+	+	+	+	+	
Использование утилиты расчета параметров ООП				+		+									
Формирование усеченного набора МСО для приближенных вычислений											+	+	+	+	+
Формирование полного набора МСО для приближенных вычислений											+	+	+		
Точный расчет вероятности вершинного			+		+	+	+			+	+	+	+		

события ДО, при независимости отказов элементов															
Приближенный расчет вероятности МСО, при независимости отказов эл-ов										+	+	+	+		
Расчет вероятности базисных событий ДО, с учетом трех типов отказов эл-тов											+	+	+	+	+
Расчет вероятности МСО, с учетом трех типов отказов эл-тов											+	+	+	+	+
Приближенный расчет вероятности реализации вершинного события ДО, при независимости отказов элементов										+	+	+	+	+	+
Приближенный расчет вероятности реализации вершинного события ДО, с учетом трех типов отказов элементов											+	+	+	+	+
Расчет значимости МСО по Fussell-Vesely с учетом трех типов отказов элементов											+	+	+	+	+
Расчет суммарной значимости МСО по Fussell-Vesely, с учетом трех типов отказов элементов											+	+	+	+	+
Расчет коэффициентов уменьшения риска базисных событий по Fussell-Vesely, при независимости отказов элементов											+	+	+	+	+
Расчет коэффициентов увеличения риска базисных событий по Fussell-Vesely, при независимости отказов элементов											+	+	+	+	+
Расчет числа входящих базисных событий в МСО при независимых отказах элементов											+	+	+	+	+

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПК АСМ СЗМА

Исследования последних лет (в частности, НИР [20], см. приложение 4) показали, что практически все известные программные средства вероятностного анализа надежности и безопасности структурно-сложных систем основываются на теоретических разработках, которые в отечественной науке получили наименование логико-вероятностных методов (ЛВМ) системного анализа [30, 31], а за рубежом – логико-вероятного исчисления (ЛВИ) [57]. Признанным во всем мире создателем и руководителем отечественной научной школы логико-вероятностных методов системного анализа является академик Рябинин Игорь Алексеевич [30-32, 57].

В наиболее общем виде класс задач, которые решаются с помощью ЛВМ и ЛВИ, можно определить следующими двумя положениями.

Заданы (известны):

1. функциональная структура S объекта, т.е. состав и связи элементов и подсистем $i = 1, 2, \dots, H$, которые в совокупности обеспечивают реализацию (или не реализацию) его функционального назначения во времени;
2. собственные вероятностные параметры безотказности p_i (или отказа $q_i = 1 - p_i$) каждого элемента $i = 1, 2, \dots, H$ исследуемой системы S .

Требуется:

вычислить вероятность $P_S = P_S(\{p_i, q_i\}, i = 1, 2, \dots, H)$ безотказной работы (безопасности, невозникновения аварии) или вероятность $Q_S = 1 - P_S$ отказа (или возникновения аварии) исследуемого системного объекта в целом, т.е. с учетом его функциональной структуры S и вероятностных параметров p_i, q_i безотказности элементов.

Для решения этой задачи средствами ЛВМ (ЛВИ) необходимо, чтобы безотказность всех элементов $i = 1, 2, \dots, H$ исследуемой системы допустимо было представлять с помощью независимых простых (бинарных) событий $\tilde{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$ с

известными (заданными) параметрами возможных исходов $p(x_i) = p_i$, $p(\bar{x}_i) = q_i$. Только в этом случае становится возможным применение основного в ЛВМ математического аппарата моделирования – алгебры логики, с последующим переходом к определению вероятностной модели для оценки исследуемого свойства устойчивости рассматриваемой системы в целом. Средствами простых переменных алгебры логики представляются исходы бинарных событий $\tilde{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$ отдельных элементов системы $i = 1, 2, \dots, H$, а параметрами $p(x_i) = p_i$, $p(\bar{x}_i) = q_i$, характеристики их устойчивости. С помощью функций алгебры логики $Y_S = Y_S(\{x_i, \bar{x}_i\}, i = 1, 2, \dots, H)$ представляются сложные события, характеризующие исследуемые свойства устойчивости рассматриваемой системы S в целом. На основе этих функций строятся расчетные вероятностные математические модели $P_S = P_S(\{p_i, q_i\}, i = 1, 2, \dots, H)$ устойчивости, с помощью которых вычисляются искомые общесистемные показатели.

Практическое применение логико-вероятностных методов и соответствующих программных средств системного анализа устойчивости (надежности, безопасности и др.) осуществляется в четыре этапа.

1. Постановка задачи. На этом этапе, сначала, конкретизируется исследуемое свойство устойчивости системы (надежность, безопасность и т.п.), а также содержание и состав вычисляемых показателей. Затем, на основе анализа функциональной структуры S системы, состава и взаимосвязей ее элементов и подсистем, строится структурная модель (граф, схема) $G(X, Y)$ выбранного свойства устойчивости объекта в целом. В этой модели X - множество вершин графа, с помощью которых представляются исходы бинарных событий $\tilde{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$, характеризующие устойчивость отдельных элементов $i = 1, 2, \dots, H$ системы, существенно влияющие на выбранный показатель устойчивости системы в целом и вероятностные параметры $p(x_i) = p_i$, $p(\bar{x}_i) = q_i$ которых известны (заданы). Множество Y в разрабатываемой структурной модели представляет логические связи между вершинами, которые в совокупности определяют условия реализации (или не ре-

лизации) выбранного свойства устойчивости системы (надежности, безопасности и др.). На завершающем этапе постановки задачи разработанному графу $G(X, Y)$ сопоставляется некоторый обобщенный критерий (условие) Y_s^* , реализация которого определяет (совместно с графом) исследуемое свойство устойчивости системы.

2. Построение логической модели. Основными исходными данными для выполнения этого этапа ЛВМ являются граф $G(X, Y)$ исследуемого свойства устойчивости системы и обобщенный критерий Y_s^* его реализации в системе. В результате выполнения данного этапа формируется так называемая логическая функция работоспособности исследуемой системы

$$\left. \begin{array}{l} G(X, Y) \\ Y_s^* \end{array} \right\} \Rightarrow Y_s = Y_s(\{x_i, \bar{x}_i\}, i = 1, 2, \dots, H) \quad (1)$$

Логическая ФРС Y_s - это явная булева функция, параметрами которой являются простые логические переменные $\tilde{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$. В целом, эта функция точно и однозначно представляет все возможные комбинации исходов элементарных событий (конечных состояний элементов системы), которые (и только которые!) отдельно и в совокупности приводят к реализации исследуемого свойства системы (безотказности, отказа, возникновения или не возникновения аварийной ситуации и др.). Сказанное означает, что логическая ФРС Y_s является, в сущности, строгим математическим описанием сложного случайного события, вероятностные характеристики которого P_s являются искомыми оценками исследуемого свойства устойчивости рассматриваемой системы в целом. Однако, непосредственное вычисление этих характеристик на основе ФРС Y_s невозможно.

3. Построение расчетной вероятностной модели. Исходной для выполнения данного этапа в ЛВМ является полученная на предыдущем шаге логическая ФРС Y_s исследуемого свойства устойчивости системы. Для обеспечения возможности вычислений ФРС Y_s преобразуется в одну из форм расчетной вероятностной математической модели, в качестве которых могут, в общем случае, выступать:

- явные многочлены вероятностных функций [1- 4, 8 - 13, 26, 27, 40]

$$Y_S(\{x_i, \bar{x}_i\}, i = 1, 2, \dots, H) \Rightarrow P_S(\{p_i, q_i\}, i = 1, 2, \dots, H) ;$$

- статистические модели [9, 10];
- марковские модели (специальная версия) [9, 10];
- сетевые модели [13].

В представленной к аттестации базовой версии ПК АСМ СЗМА реализована технология автоматического построения и применения для расчетов явных многочленов вероятностных функций.

4. Выполнение расчетов вероятностных характеристик. На этом этапе, на основе той или иной формы расчетной математической модели производятся вычисления различных показателей исследуемого свойства устойчивости (надежности, живучести, безопасности) исследуемой системы.

Важной особенностью всех логико-вероятностных методов системного анализа является высокий формализм теоретической разработки этапов построения логических и вероятностных математических моделей. Это позволило ряду отечественных и зарубежных организаций осуществить полную автоматизацию последних трех этапов ЛВМ и разработать несколько образцов программных комплексов, реализующих (на базе ЛВМ) информационную технологию автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности и безопасности различных технических и организационных систем большой размерности и высокой структурной сложности [1, 9-13, 21-27, 55, 56, 58, 59, 66]. Однако многие из указанных комплексов существенно различаются по уровню реализации возможностей ЛВМ, методам автоматического построения логических и вероятностных математических моделей, программной реализации, составу вычисляемых показателей и методикам их практического применения.

Одним из важных отличительных признаков различных программ, реализующих ЛВМ, является **вид графического аппарата**, используемого для построения графа $G(X, Y)$, структурного описания исследуемых свойств устойчиво-

сти систем. К настоящему времени наиболее широкое применение получили следующие графические аппараты структурного моделирования:

- блок-схемы (комплексы: "Relex RBD", США [21, 22, 66]; "КОК", РФ [58]; "RAY", РФ [59]);
- деревья отказов и событий (комплексы: "Risk Spectrum", Швеция [23-25]; "Relex FT", США [21, 22, 66]; "РИСК", РФ [55]; "CRISS 4.0", РФ [56, 69], Sapphire-7 [70]).

Другим важным отличительным признаком является уровень реализации в программных комплексах возможностей основного аппарата моделирования - **алгебры логики**. Большинство известных программных комплексов ограничены классом только монотонных логико-вероятностных методов моделирования систем в функционально не полном базисе логических операций "И" и "ИЛИ".

Теоретической и методологической основой представленного к аттестации ПК АСМ СЗМА являются разработанные в середине 80-х - начале 90-х годов общий логико-вероятностный метод системного анализа [5, 29] и новая информационная технология автоматизированного структурно-логического моделирования [4, 7]. В них используется специальный графический аппарат описания структур свойств надежности и безопасности исследуемых систем – **схемы функциональной целостности** [5, 6, 7, 26, 29]. ОЛВМ и аппарат СФЦ по построению реализуют все возможности алгебры логики в функционально полном базисе операций "И", "ИЛИ" и "НЕ".

В следующем разделе верификационного отчета излагаются основы теории ОЛВМ и аппарата СФЦ, а также методические положения технологии АСМ в объеме, достаточном для проведения аттестации ПК АСМ СЗМА.

2.1. ОБЩИЙ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД

Разработанный в середине 80-х годов общий логико-вероятностный метод системного анализа [5, 7, 10, 26, 29, 40] является дальнейшим развитием классических ЛВМ [30-32] в следующих направлениях:

- реализации всех возможностей основного аппарата моделирования алгебры логики на основе обеспечения возможности использования функционального полного базиса логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ" на всех четырех основных этапах (постановки задач, построения логических ФРС, построения многочленов ВФ и выполнения расчетов);
- комплексной автоматизации процессов построения математических моделей и выполнения расчетов вероятностных характеристик систем.

Достижение этих целей на основе известных типовых структурных схем (блок-схем, графов связности, деревьев отказов, деревьев событий и др.) не могла быть в полной мере осуществлена, поскольку по построению они не реализуют всех возможностей основного аппарата моделирования ЛВМ – алгебры логики. Поэтому в 1982 году был разработан новый, логически полный графический аппарат $G(X, Y)$ структурного описания свойств устойчивости (надежности и безопасности) систем, названный схемой функциональной целостности [5, 29]. СФЦ по построению реализует функционально полный набор логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ" алгебры логики, что позволяет с их помощью логически корректно представлять практически все виды типовых структурных схем, а также принципиально новый класс немонотонных структурных моделей надежности и безопасности сложных систем. В процессе разработки ОЛВМ были созданы методы, алгоритмы и программы автоматического построения на основе СФЦ монотонных и немонотонных логических ФРС и многочленов расчетных вероятностных функций [4, 26, 27, 29] для анализа надежности и безопасности систем большой размерности и высокой структурной сложности. На основе этих результатов были созданы все программные комплексы, реализующие технологию АСМ [9-11, 13, 26, 27, 40], включая представляемый к аттестации ПК АСМ СЗМА [1-4].

2.1.1. Изобразительные средства и типовые фрагменты СФЦ

Любой графический аппарат, в сущности, является языком описания структур систем. Как и все другие языки, он определяется алфавитом, синтаксисом и семантикой. Алфавит СФЦ образуют ее основные изобразительные средства, ко-

торые включают в себя два вида вершин (функциональные и фиктивные), два вида выходов (прямые и инверсные) и два вида ребер (дизъюнктивные и конъюнктивные), для представления заходящих в вершины СФЦ связей функционального подчинения.

2.1.1.1. Функциональные вершины СФЦ

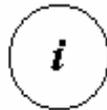


Рис. 6. Обозначение функциональной вершины в СФЦ

$i \in H$ - номер функциональной вершины (элемента, базисного события);

x_i - логическая переменная, представляющая свершение собственного, элементарного события, сопоставленного элементу i системы (безотказная работа, отказ и т.п.);

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

Главное назначение функциональных вершин состоит в графическом отображении в графе $G(X, Y)$ прямых исходов бинарных событий $\tilde{x}_i = x_i$, которыми в СФЦ представляются элементы i исследуемой системы.

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

- сохранение работоспособности технического средства в течение заданного времени его работы (наработки);
- отказ технического средства в любой момент заданного времени работы;
- принятие (или непринятие) некоторого решения на определенном этапе процесса управления системой;
- правильное выполнение заданной функции (или ошибка) оператора на заданном этапе управления системой;

- выполнение (или невыполнение) заданной функции данным техническим средством или подсистемой;
- поражение (или не поражение) объекта в результате возникновения аварийной ситуации или вредного воздействия и др.

В общем логико-вероятностном методе функциональные вершины СФЦ имеют следующее аналитическое определение:

$$\tilde{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}; p_i = p_i(t); q_i = q_i(t) = 1 - p_i = 1 - p_i(t) \quad (2)$$

Правила работы с функциональными вершинами в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §4.1).

2.1.1.2. Дизъюнктивные ребра (дуги) в СФЦ

Все ребра в СФЦ направленные и предназначены для графического представления реально существующих в системе отношений функционального подчинения между элементами (вершинами СФЦ) и подсистемами. Направленность дизъюнктивных ребер обозначается стрелками. Вершина, из которой дуга исходит, называется обеспечивающей, а вершина, в которую дуга заходит, – обеспечиваемой.

Дизъюнктивные ребра СФЦ предназначены для графического отображения следующих двух видов информации:

- а) дуга, исходящая из вершины i , обозначается y_i (прямая выходная дуга или прямая интегративная функция) и представляет все условия, необходимые для реализации (выполнения) выходной функции элементом i системы;
- б) дуга (интегративная функция) y_j , исходящая из обеспечивающей вершины j и заходящая в вершину i , обозначает одно дизъюнктивное логическое условие обеспечения реализации выходной функции y_i элементом i системы.

На Рис. 7 изображены типовые варианты использования дизъюнктивных дуг в СФЦ.

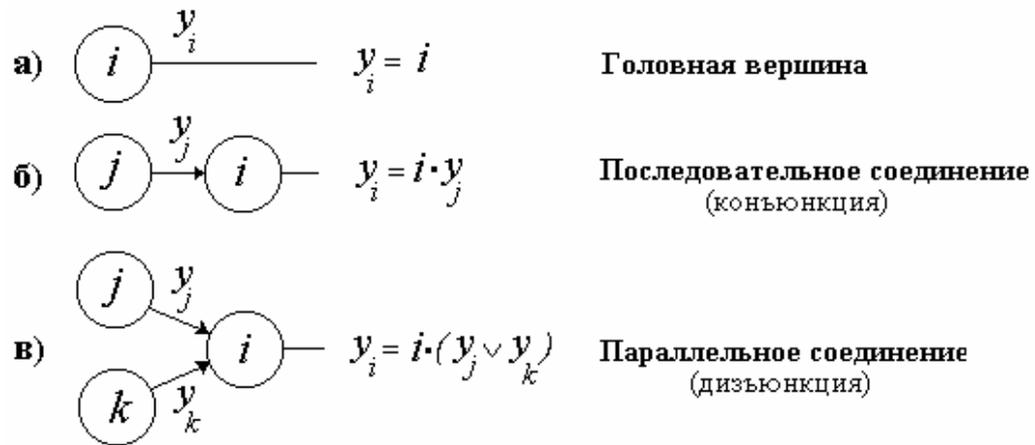


Рис. 7. Типовые варианты использования дизъюнктивных дуг в СФЦ

Вариант структурной схемы на Рис. 7.а представляет вершину без заходящих в нее дуг (без обеспечения). Такие вершины называют **головными**. Элементы систем, представляемые в СФЦ головными вершинами, считаются достоверно обеспеченными. Это значит, что условия реализации прямой выходной функции y_i головной вершины определяется свершением только собственного события x_i . Аналитически такое условие определяется следующим логическим уравнением:

$$y_i = x_i \quad (3)$$

Схема на Рис. 7.б представляет одиночную связь функционального подчинения элемента i элементу j . Это означает, что прямая выходная функция y_i элемента i реализуется, если свершилось собственное событие x_i и реализована обеспечивающая функция y_j элемента j . Логическое уравнение в этом случае имеет вид

$$y_i = x_i \cdot y_j \quad (4)$$

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

Последняя схема, изображенная на Рис. 7.в, представляет условия дублированного (резервированного, дизъюнктивного) обеспечения элемента i системы хотя бы одной из двух интегративных функций y_j или y_k . Это означает, что меж-

ду функциями y_j и y_k в системе реализованы дизъюнктивные (логическая операция "ИЛИ") организационные отношения. Логическое уравнение, соответствующее фрагменту СФЦ на Рис. 7.в, следующее

$$y_i = x_i \cdot (y_j \vee y_k) \quad (5)$$

Дизъюнктивные организационные отношения в СФЦ являются аналогами известных параллельных соединений элементов в блок-схемах, графах связности и операторов "ИЛИ", используемых в деревьях отказов.

Правила работы с дизъюнктивными дугами в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3 §4.2). Дополнительно можно отметить, что в ПК АСМ СЗМА при построении СФЦ в каждую вершину может заходить и исходить неограниченное число дуг. Без ограничений могут использоваться циклические (кольцевые) связи функционального подчинения для представления с помощью СФЦ различных подсистем с мостиковой структурой.

Рассмотренных изобразительных средств СФЦ (функциональные вершины и дизъюнктивные ребра) уже достаточно, чтобы представить все графические и логические возможности типовых блок-схем и графов связности, которые нашли широкое применение в известных структурных методах вероятностного анализа систем.

Вместе с тем, аппарат СФЦ обладает рядом дополнительных возможностей, которые позволяют строить модели надежности и безопасности систем с более сложной логической организацией работы элементов.

2.1.1.3. Фиктивные вершины в СФЦ

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

ны приведено на Рис. 8. Собственно фиктивная вершина φ в СФЦ рассматривается как логическая константа I (истина), т.е. некоторое условное, достоверное событие, вероятность реализации которого p_φ принимается равной единице (достоверное событие прямого исхода).



Рис. 8. Обозначение фиктивной вершины в СФЦ

$x_\varphi = I$ - логическая единица, истина;

$p_\varphi = 1$ - достоверное событие.

В общем логико-вероятностном методе фиктивные вершины имеют следующее аналитическое определение:

$$x_\varphi = I \text{ (истина); } p_\varphi(t) = p_\varphi = 1; \overline{x_\varphi} = O \text{ (ложь); } q_\varphi(t) = q_\varphi = 0 \quad (6)$$

Примеры использования фиктивных вершин в СФЦ приведены на Рис. 9.

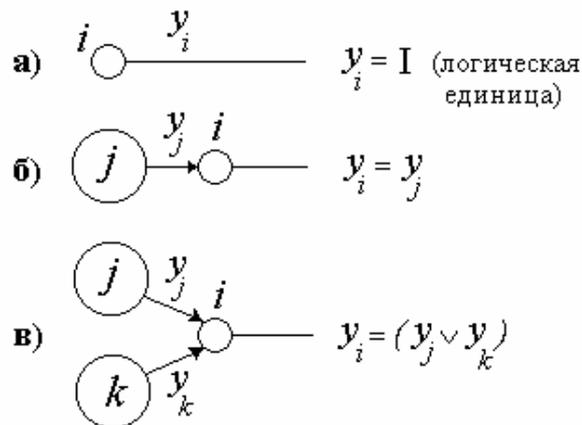


Рис. 9. Типовые варианты использования фиктивных вершин в СФЦ

Из сравнения Рис. 9 и Рис. 7 следует, что логические уравнения выходных интегральных функций для фиктивных вершин отличаются от аналогичных

уравнений для функциональных вершин только отсутствием в записи обозначений простых логических переменных x_i .

Фиктивные вершины в СФЦ являются аналогами точечных соединений дуг, применяемых в блок-схемах и графах связности, и логических операторов объединения ребер в деревьях отказов. Введенные графические и аналитические обозначения фиктивных вершин позволяют использовать их в СФЦ совместно с функциональными вершинами, с сохранением всех правил логического и вероятностного моделирования.

Правила работы с фиктивными вершинами в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §4.1).

2.1.1.4. Конъюнктивные дуги в СФЦ

Конъюнктивные дуги используются в СФЦ наравне с дизъюнктивными дугами (см. Рис. 7). Однако направленность связей функционального подчинения на концах конъюнктивных дуг обозначается не стрелками, а точками. С помощью конъюнктивных дуг в СФЦ представляются условия, когда элементы параллельных ветвей не дублируют (не резервируют) друг друга, а должны функционировать все вместе, одновременно.

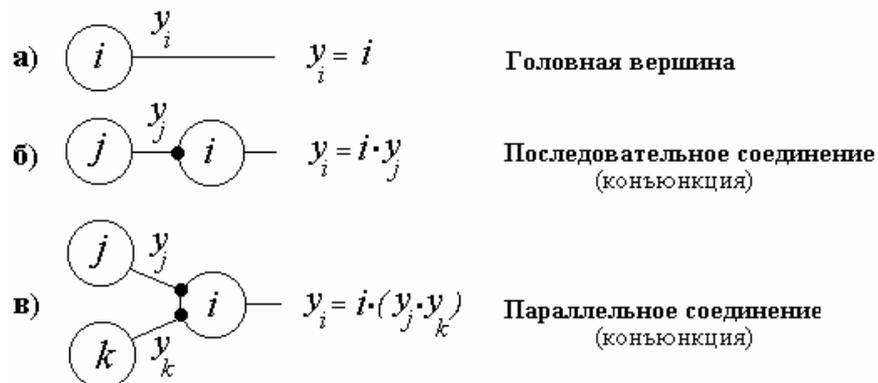


Рис. 10. Типовые варианты использования конъюнктивных дуг в СФЦ

Сравнивая Рис. 10 и Рис. 7 видим, что, по определению, головные вершины и последовательные соединения, изображенные в СФЦ с помощью одиночных

дизъюнктивных и одиночных конъюнктивных дуг, являются в логическом смысле совершенно одинаковыми.

Главное назначение конъюнктивных дуг в СФЦ состоит в представлении конъюнктивных (логический оператор "И") организационных отношений между соответствующими обеспечивающими интегративными функциями (заходящими дугами с точками). Так, логическое условие реализации выходной функции y_i схемы, изображенной на Рис. 10.в, состоит в одновременной реализации функций y_j и y_k двух обеспечивающих элементов j и k :

$$y_i = x_i \cdot (y_j \cdot y_k) \quad (7)$$

Конъюнктивные дуги в СФЦ позволяют иным, чем последовательное соединение, способом представить условия одновременной (конъюнктивной) реализации нескольких обеспечивающих функций в системе. В типовых блок-схемах и графах связности такой способ представления конъюнктивных отношений не реализован. В деревьях отказов конъюнктивные отношения представляются с помощью логического оператора "И".

Правила работы с конъюнктивными дугами (ребрами) в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §4.2). Дополнительно можно отметить, что при построении СФЦ в каждую вершину может заходить до 20 конъюнктивных дуг связей функционального подчинения, а исходить - неограниченное число дуг. Могут использоваться циклические связи функционального подчинения для представления с помощью СФЦ подсистем, со структурой мостикового типа.

2.1.1.5. Совместное применение дизъюнктивных и конъюнктивных дуг в СФЦ

Аппарат СФЦ позволяет представлять сложные смешанные организационные отношения между несколькими конъюнктивными и дизъюнктивными связями функционального подчинения. В этом случае обеспечение элемента i определяется реализацией одновременно нескольких дизъюнктивных и конъюнктивных

условий. Пример представления в СФЦ смешанного фрагмента конъюнктивно-дизъюнктивного обеспечения элемента i изображен на Рис. 11.

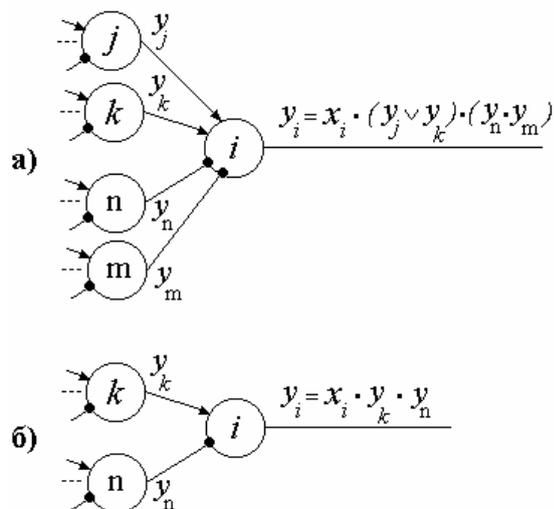


Рис. 11. Варианты смешанного обеспечения вершин СФЦ

СФЦ на Рис. 11.а представляет фрагмент системы, где реализация выходной функции исполнительного элемента i определяется его собственной безотказностью (x_i) и условиями y_j, y_k, y_n, y_m обеспечения тремя видами ресурсов:

- y_j, y_k – электроэнергией;
- y_n – водой;
- y_m – воздухом.

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

В смешанных организационных отношениях между группами дизъюнктивных и группами конъюнктивных заходящих дуг всегда устанавливается знак логического умножения (знак конъюнкции). Это означает, что общая функция смешанного обеспечения реализуется, если имеются одновременно все без исключения функции конъюнктивной группы и хотя бы одна функция дизъюнктивной группы. Полезно осмыслить один, частный случай смешанного обеспечения, СФЦ которого приведена на Рис. 11.б. Здесь присутствуют две одиночные захо-

дящие дуги, обеспечивающие элемент i , одна дизъюнктивная y_k и одна конъюнктивная y_n . По правилам построения СФЦ между этими функциями в логическом уравнении записывается знак логического умножения.

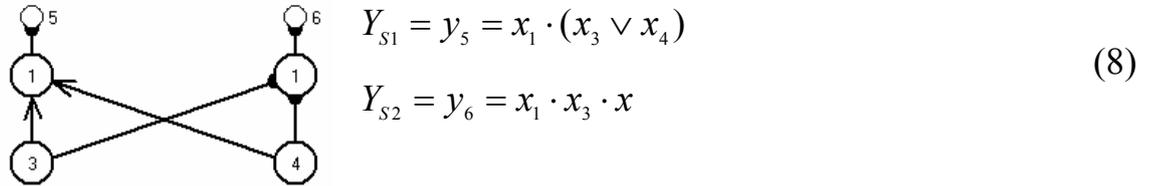
2.1.1.6. Размножение функциональных вершин

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

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

Поскольку все размноженные функциональные вершины в СФЦ имеют одинаковые схемные номера, может возникнуть проблема учета разных размноженных вершин одной группы в записи логических критериев функционирования. Суть проблемы заключается в том, что в записи ЛКФ нельзя указывать общий номер всей размноженной группы функциональных вершин. В этом случае возникает неопределенность адресации конкретной вершины из размноженной группы. Чтобы исключить такую неопределенность необходимо ввести в СФЦ дополнительную фиктивную вершину с собственным номером и обеспечить ее конъюнктивной связью с выбранной для ЛКФ размноженной функциональной верши-

ной. Тогда, для корректного решения задачи, в записи ЛКФ достаточно указать выходную интегративную функцию введенной дополнительной фиктивной вершины. Сказанное можно проиллюстрировать следующим простым соотношением:



В изображенной СФЦ присутствует группа из двух размноженных вершин с номером 1. Эта группа представляет условия реализации двух функций одного элемента рассматриваемой системы. Для записи в ПК АСМ СЗМА логического критерия Y_{S1} реализации первой функции элемента 1 в СФЦ введена дополнительная фиктивная вершина 5, а для записи критерия реализации второй функции элемента 1 – дополнительная фиктивная вершина 6. Эти ЛКФ и соответствующие им ФРС представлены соотношениями (8).

В одной основной и каждой отдельной декомпозированной СФЦ может быть неограниченное количество групп размноженных функциональных вершин. Не допускается размножение вершин, входящих в СФЦ разных декомпозированных подсистем и в группы ООП.

2.1.1.7. Представление логической операции инвертирования в СФЦ

Для реализации в ОЛВМ всех возможностей основного аппарата моделирования алгебры логики в СФЦ предусмотрена возможность графического представления логической операции "НЕ" (инвертирования). Таким образом, набор логических операций, графически представляемых в СФЦ, является функционально полным ("И", "ИЛИ", "НЕ").

Графическое отображение логической операции инвертирования в СФЦ реализовано с помощью специального вида выхода дуги из вершин, который назван **инверсным выходом**. Инверсный выход можно отображать на любой функ-

циональной, фиктивной, размноженной или эквивалентированной вершине. Типовые примеры изображения инверсных выходов вершин в СФЦ приведены на Рис. 12.

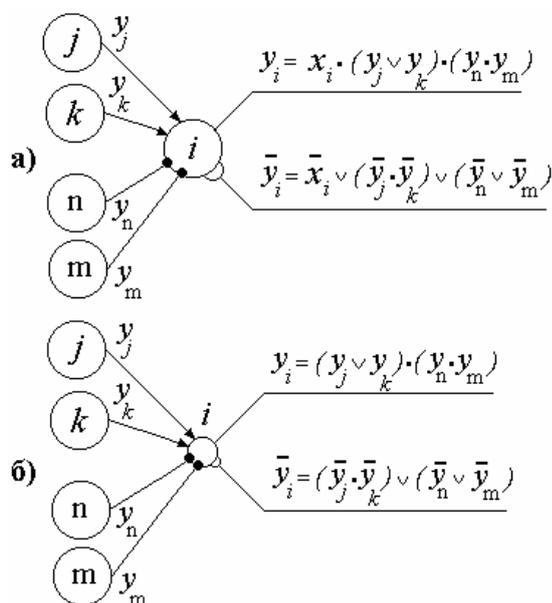


Рис. 12. Примеры изображения инверсных выходов в СФЦ

СФЦ на Рис. 12.а отличается от СФЦ на Рис. 11.а наличием второго инверсного выхода \bar{y}_i функциональной вершины i . По смысловому содержанию инверсный выход является точной логической противоположностью (логическим дополнением) прямого выхода из вершины, который применялся во всех ранее рассмотренных структурных схемах. Например, если прямой выход используется для обозначения условия работоспособности или безопасности системы, то инверсный выход точно и однозначно представляет условия неработоспособности этой системы или условия возникновения аварийной ситуации.

На Рис. 12.б приведено изображение и логическое уравнение инверсного выхода из фиктивной вершины СФЦ.

2.1.2. Обобщенный структурный фрагмент СФЦ

Рассмотренные выше изобразительные средства СФЦ (см. Рис.6 – Рис. 12 и выражения (3) – (7)), можно представить одним обобщенным структурным фраг-

ментом и двумя базовыми аналитическими соотношениями (логическими уравнениями). Схема обобщенного структурного фрагмента СФЦ приведена на Рис. 13.

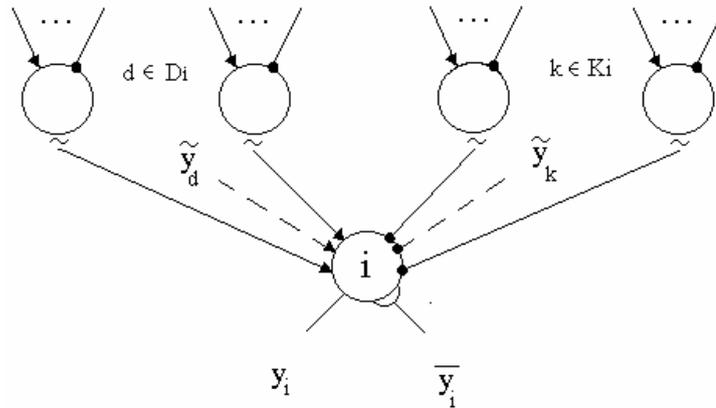


Рис. 13. Схема обобщенного фрагмента СФЦ

Здесь обеспечивающие вершины разделены на две группы — дизъюнктивную и конъюнктивную. Номера d обеспечивающих вершин дизъюнктивной группы составляют множество D_i , а номера k обеспечивающих вершин конъюнктивной группы составляют множество K_i . С помощью знака "тильда" на схеме обозначена возможность использования в СФЦ любого из двух выходов обеспечивающих вершин - прямого или инверсного. Знаком тильды отмечены и выходные интегративные функции обеспечивающих вершин, которые также могут быть прямыми или инверсными

$$\begin{aligned}\tilde{y}_d &= \{y_d, \overline{y}_d\}; \\ \tilde{y}_k &= \{y_k, \overline{y}_k\};\end{aligned}\tag{9}$$

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

Для прямой выходной интегративной функции

$$\begin{aligned}\text{а). } y_i &= x_i \cdot \left(\bigvee_{d \in D_i} \tilde{y}_d\right) \cdot \left(\big\&_{k \in K_i} \tilde{y}_k\right), \quad i - \text{функциональная вершина} \\ \text{в). } y_i &= \left(\bigvee_{d \in D_i} \tilde{y}_d\right) \cdot \left(\big\&_{k \in K_i} \tilde{y}_k\right), \quad i - \text{фиктивная вершина}\end{aligned}\tag{10}$$

Для инверсной выходной интегративной функции

$$\begin{aligned} \text{а) } \bar{y}_i &= \bar{x}_i \vee (\& \bar{y}_d) \vee (\vee \bar{y}_k), \quad i - \text{функциональная вершина} \\ \text{в) } \bar{y}_i &= (\& \bar{y}_d) \vee (\vee \bar{y}_k), \quad i - \text{фиктивная вершина} \end{aligned} \quad (11)$$

Выражения (10.а) и (11.а) определяют случай, когда вершина i функциональная, а (10.б) и (11.б), когда вершина i фиктивная (см. Рис. 8.).

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

Из (10) и (11) могут быть легко получены все рассмотренные выше частные фрагменты СФЦ и соответствующие им логические уравнения. Например, если вершина i функциональная и в схеме ее обеспечения отсутствует (равна логической единице 1) конъюнктивная часть ФО (в схеме нет заходящих дуг с точками), то (10.а) точно представляет аппарат графов связности (см. выражения (3)- (5)).

Если в схеме отсутствует дизъюнктивная часть ФО (нет заходящих дуг со стрелками), то из (10.а) получаем все типовые варианты использования конъюнктивных дуг в СФЦ (см. выражение (7)). Отсутствие в записях функций (10) и (11) всей ФО определяет головную (функциональную или фиктивную) вершину в СФЦ.

2.1.3. Эквивалентированные вершины в СФЦ

В представленной к аттестации базовой версии ПК АСМ СЗМА реализована возможность двухуровневой односвязной структурной декомпозиции СФЦ исследуемой системы. Декомпозиция позволяет существенно увеличить размер-

ность исследуемых с помощью ПК АСМ СЗМА сложных системных объектов и сократить общее время автоматизированного моделирования и расчетов показателей.

Основная СФЦ системы (СФЦ первого уровня, без декомпозиции) представляется пользователем непосредственно в окне ввода СФЦ интерфейса ПК АСМ СЗМА (см. Рис. 2 п.4). Для этого используются все ранее рассмотренные основные графические средства аппарата схем функциональной целостности (функциональные и фиктивные вершины, прямые и инверсные выходы, дизъюнктивные и конъюнктивные дуги). При этом каждая функциональная вершина представляет один простой (неструктурированный) элемент исследуемой системы с заданными его вероятностными и другими параметрами.

Для создания эквивалентированной вершины в ПК АСМ СЗМА необходимо выполнить действия, описанные в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §4.4). При этом соответствующая функциональная вершина графа основной СФЦ автоматически преобразуется к виду треугольника (эквивалентированная вершина) и открывается специальное окно ввода СФЦ второго уровня декомпозиции. Каждая функциональная вершина основной СФЦ (первого уровня) может быть преобразована в так называемую эквивалентированную вершину, которая имеет вид треугольника и представляет соответствующую декомпозированную одно-связную подсистему. В примере, изображенном на Рис. 14, приведены эквивалентированная вершина 6 системы и граф СФЦ второго уровня, представляющий структуру соответствующей декомпозированной подсистемы.

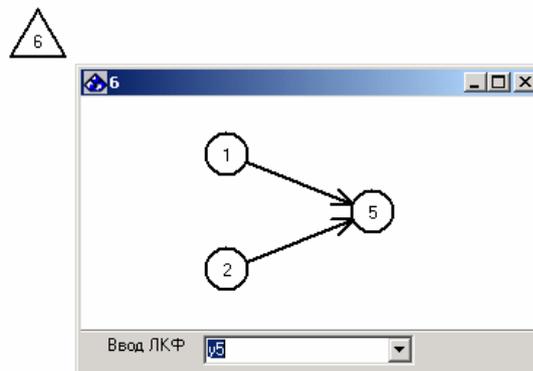


Рис. 14. Пример формирования эквивалентированной вершины в ПК АСМ СЗМА

Правила работы с эквивалентированными вершинами в ПК АСМ СЗМА приведены в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §4.4).

2.1.4. Логическое моделирование в ПК АСМ СЗМА

В ПК АСМ СЗМА задача логического моделирования выполняется программными модулями библиотеки ЛОГ&ВФ (см. Рис. 1 блок 4). Исходными данными здесь являются СФЦ исследуемой системы и, так называемый, логический критерий функционирования

$$Y_F^* = Y_F(\{y_i, \bar{y}_i\}, i = 1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

Здесь и далее буквой F обозначаются режим функционирования системы, исследуемое системное свойство надежности или безопасности или одна из множества выходных функций, которой это свойство сопоставляется.

ЛКФ представляет собой бесскобочную булеву функцию, аргументами которой выступают обозначения выходных интегративных функций тех вершин СФЦ, которые в указанной совокупности представляют исследуемое свойство надежности или безопасности системы. ЛКФ задается пользователем после построения СФЦ, непосредственно перед началом решения задачи ПК АСМ СЗМА (см. Рис. 2, п.3). В технологии «деревьев отказов» аналогом ЛКФ является понятие «верхнего события» [24]. Однако ЛКФ предоставляет пользователю более широкие возможности постановки различных задач, поскольку с его помощью могут определяться самые разные системные события (работоспособность, отказ, безопасность, возникновение аварийной ситуации, уровень эффективности, риск, готовность, неготовность и т.п.) как исследуемой системы в целом, так и любых ее структурных фрагментов и подсистем.

Правила ввода и редактирования ЛКФ в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §7).

На Рис. 15. изображена общая схема решения задачи определения логической ФРС в ПК АСМ СЗМА.

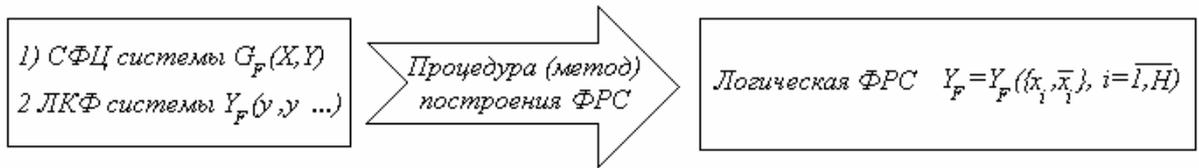


Рис. 15. Схема этапа определения логической ФРС

В основе процедуры определения логических ФРС лежат специальные методы и программные средства решения систем логических уравнений, представляемых СФЦ, для любого заданного ЛКФ [26, 27]

$$\left. \begin{array}{l} \text{СФЦ: } G(X, Y) \\ \text{ЛКФ: } Y_F^* \end{array} \right\} \Rightarrow \text{ФРС: } Y_F = Y_F(\{x_i, \bar{x}_i\}, i = 1, 2, \dots, H). \quad (13)$$

Автоматически сформированная в ПК АСМ СЗМА логическая ФРС может представлять полное множество кратчайших путей успешного функционирования [30] (минимальных отсечных сочетаний [34]), минимальных сечений отказов [30] (минимальных пропускных сочетаний [34]), а также различные их немонотонные комбинации. Также каждая ФРС точно и однозначно соответствует множеству состояний исследуемой системы, в которых (и только в которых) она реализует заданный логический критерий функционирования. В событийном смысле ФРС является точным и однозначным математическим описанием того сложного случайного события, вероятностные характеристики которого являются искомой количественной оценкой свойств надежности или безопасности исследуемой системы и/или различных ее фрагментов и подсистем.

В отличие от классических ЛВМ, в ОЛВМ понятие логической ФРС принято толковать расширенно. То есть ФРС, в зависимости от вида СФЦ и ЛКФ, может представлять не только работоспособность или безопасность, но и отказы или аварии исследуемой системы, а также различные их немонотонные комбинации.

2.1.4.1. Метод определения логических функций в ПК АСМ СЗМА

Методы построения логических ФРС являются составной частью общего логико-вероятностного метода системного анализа и изложены в публикациях [5,

26, 27, 29]. В ОЛВМ разработано три метода, соответствующие алгоритмы и программы аналитического решения этой задачи:

- метод универсальной аналитической подстановки и алгоритм поиска в ширину [5, 29] (все виды СФЦ, включая циклические, и ЛКФ);
- метод прямой аналитической подстановки и алгоритм поиска в ширину [29] (СФЦ без циклов, все виды ЛКФ);
- универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программа поиска в глубину [26, 27, 29] (все виды СФЦ, включая циклические, с размноженными вершинами, группами несовместных событий (ГНС), и произвольных ЛКФ).

Все методы, соответствующие алгоритмы и программы определения логических ФРС основываются на следующих положениях (этапах) метода (и алгоритма) универсальной аналитической подстановки (впервые опубликован в [5, 29]).

Укрупненный алгоритм универсальной подстановки

Начало

1. Граф $G(X, Y)$ исходной СФЦ системы представляется в виде системы логических уравнений

$$y_i = x_i \cdot (f_{\phi_{oi}}(\tilde{y}_j)), \quad \bar{y}_i = \bar{x}_i \vee (\overline{f_{\phi_{oi}}(\tilde{y}_j)}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

в функционально полном базисе операций "И", "ИЛИ" и "НЕ". Здесь y_i, \bar{y}_i - интегративные функции, соответствующие прямой и инверсной дугам, исходящим из вершины с номером i графа СФЦ. Функция $f_{\phi_{oi}}(\tilde{y}_j)$ называется "функцией обеспечения" и записывается в уравнение на основе дуг графа СФЦ, заходящих в вершину i . Уравнения (14) записываются по правилам, указанным в выражениях (10) и (11).

2. Задается логический критерий функционирования исследуемой системы, который по усмотрению пользователя ПК АСМ СЗМА представляет исследуемое свойство надежности (безотказность, отказ, частичный отказ и т.п.) или безопасности (возникновения, не возникновения аварийной ситуации или аварии). В общем случае ЛКФ имеет вид, указанный в выражении (12):

$$Y_F^* = Y_F(\{y_i, \bar{y}_i, i = 1, 2, \dots, N\}) \quad (15)$$

3. Решение системы логических уравнений (14) осуществляется путем подстановки в правую часть ЛКФ (15) вместо обозначений y_i, \bar{y}_i правых частей соответствующих уравнений из системы (14). Процесс подстановки и раскрытия выражений осуществляется по стандартным правилам алгебры логики с учетом логических циклов, логических противоречий, размножения вершин и групп несовместных событий [5, 26, 27, 29]. Указанная подстановка выполняется до тех пор, пока не будут раскрыты все обозначения интегративных функций y_i, \bar{y}_i и в полученном выражении останутся только обозначения простых логических переменных x_i, \bar{x}_i .
4. Выполняется минимизация полученного на предыдущем шаге выражения по правилам алгебры логики. Полученная минимальная дизъюнктивная нормальная форма является искомой логической функцией системы. Она точно и однозначно соответствует заданному ЛКФ (15) и исходной СФЦ системы $G(X, Y)$, представленной системой логических уравнений (14).

Конец

Пример. Вариант СФЦ безопасности участка железной дороги (см. приложение 4, НИР "технология 2004", стр.197-218) и соответствующая система логических уравнений приведены на рис.4.

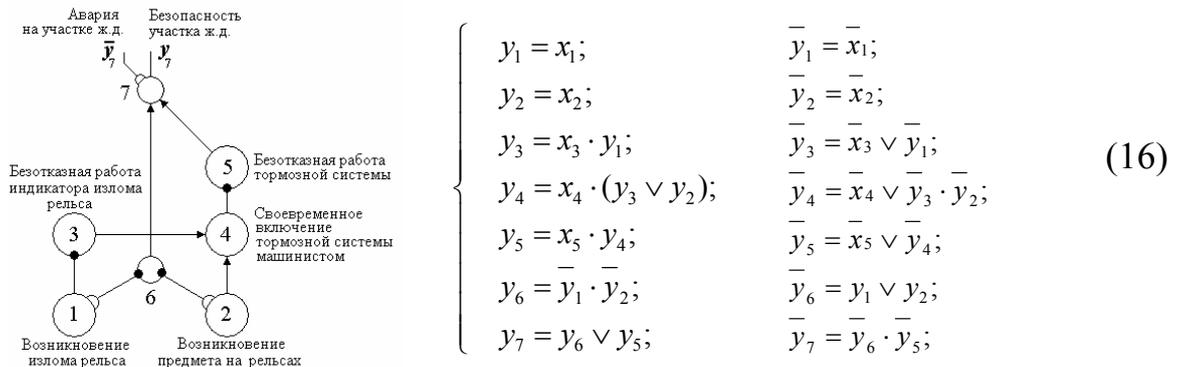


Рис. 16. СФЦ структурной модели безопасности участка железной дороги

Прямой выход y_7 фиктивной вершины 7 определяет критерий безопасности (отсутствия аварии), а инверсный выход \bar{y}_7 определяет критерий возникновения аварии на рассматриваемом участке железной дороги:

$$Y_{\text{безопасности}} = y_7; \quad (17)$$

$$Y_{\text{аварии}} = \bar{y}_7. \quad (18)$$

Решения находятся, путем последовательного выполняя пунктов алгоритма подстановки в указанные логические критерии до получения следующих логических ФРС:

$$\begin{aligned} Y_{\text{безопасности}} &= y_7 = y_6 \vee y_5 = \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2 \vee y_5 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_5 \cdot y_4 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_5 \cdot x_4 \cdot (y_2 \vee y_3) = \\ &= \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_5 \cdot x_4 \cdot (x_2 \vee x_3 \cdot y_1) = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_5 \cdot x_4 \cdot (x_2 \vee x_3 \cdot x_1) = \\ &= \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_5 \cdot x_4 \cdot x_2 \vee x_5 \cdot x_4 \cdot x_3 \cdot x_1 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Y_{\text{аварии}} &= \bar{y}_7 = \bar{y}_6 \cdot \bar{y}_5 = (y_1 \vee y_2) \cdot (\bar{x}_5 \vee \bar{y}_4) = (x_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_5 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{y}_3 \cdot \bar{y}_2) = \\ &= (x_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_5 \vee \bar{x}_4 \vee (\bar{x}_3 \vee \bar{y}_1) \cdot \bar{x}_2) = (x_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_5 \vee \bar{x}_4 \vee (\bar{x}_3 \vee \bar{x}_1) \cdot \bar{x}_2) = \\ &= (x_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_5 \vee \bar{x}_4 \vee (\bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)) = x_1 \cdot \bar{x}_5 \vee x_1 \cdot \bar{x}_4 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_5 \vee x_2 \cdot \bar{x}_4 \end{aligned} \quad (20)$$

Необходимо отметить, что понятие логической ФРС в ОЛВМ и технологии АСМ принято толковать расширенно. То есть ФРС, в зависимости от вида СФЦ и ЛКФ, может представлять не только работоспособность или безопасность, но и отказы или аварии исследуемой системы, а также различные их немонотонные комбинации.

Непосредственно в ПК АСМ СЗМА использована одна из наиболее эффективных реализаций рассмотренного алгоритма подстановки, получившая название **универсального графоаналитического метода (УГМ)** решения систем логических уравнений [26, 27].

2.1.4.2. Алгоритмическая схема универсального графоаналитического метода определения логических ФРС

В УГМ логическая ФРС определяется путем построения специального дерева решений, состав и описание узлов которого приведены в табл.3

Состав узлов дерева решений УГМ определения ФРС

Таблица 3

№ п/п	Графическое обозначение	Описание узлов дерева решений системы логических уравнений
1	\tilde{i}	Исходный узел. Представляет в дереве решений установленную в формируемый столбец, но не принятую к раскрытию интегративную функцию
2	$\odot \tilde{i}$	Раскрываемый действительный узел. Представляет принятую к раскрытию интегративную функцию \tilde{y}_i функциональной вершины i СФЦ и обозначает реализации соответствующего собственного бинарного события.
3	$\square \tilde{i}$	Раскрываемый условный узел. Представляет принятую к раскрытию интегративную функцию \tilde{y}_i фиктивной вершины i СФЦ или начальный этап раскрытия инверсной выходной функции функциональной вершины.
4	$\odot \tilde{i} \parallel$	Собственно раскрытый действительный узел. Представляет либо головную функциональную вершину СФЦ, либо функциональную вершину, условие обеспечения которой уже реализовано в вышестоящей части формируемого столбца дерева решений.
5	$\square \tilde{i} \parallel$	Собственно раскрытый условный узел. Представляет либо головную фиктивную вершину СФЦ, либо фиктивную вершину, условие обеспечения которой уже реализовано в вышестоящей части формируемого столбца дерева решений.
6	$\odot \tilde{i} \parallel$	Раскрытый по обеспечению действительный узел. Представляет функциональную вершину СФЦ, условие обеспечения которой реализовано в нижестоящей части формируемого столбца дерева решений.
7	$\square \tilde{i} \parallel$	Раскрытый по обеспечению условный узел. Представляет фиктивную вершину СФЦ, условие обеспечения которой реализовано в нижестоящей части формируемого столбца дерева решений.
8	$\downarrow \tilde{i}$	Смещенный узел. Обозначает перенос исходного узла i в нижестоящую позицию столбца дерева решений, для последующего раскрытия.

На рис.17.а и рис.17.б изображены два дерева решений системы логических уравнений (16), построенные с помощью УГМ для критериев (17) и (18).

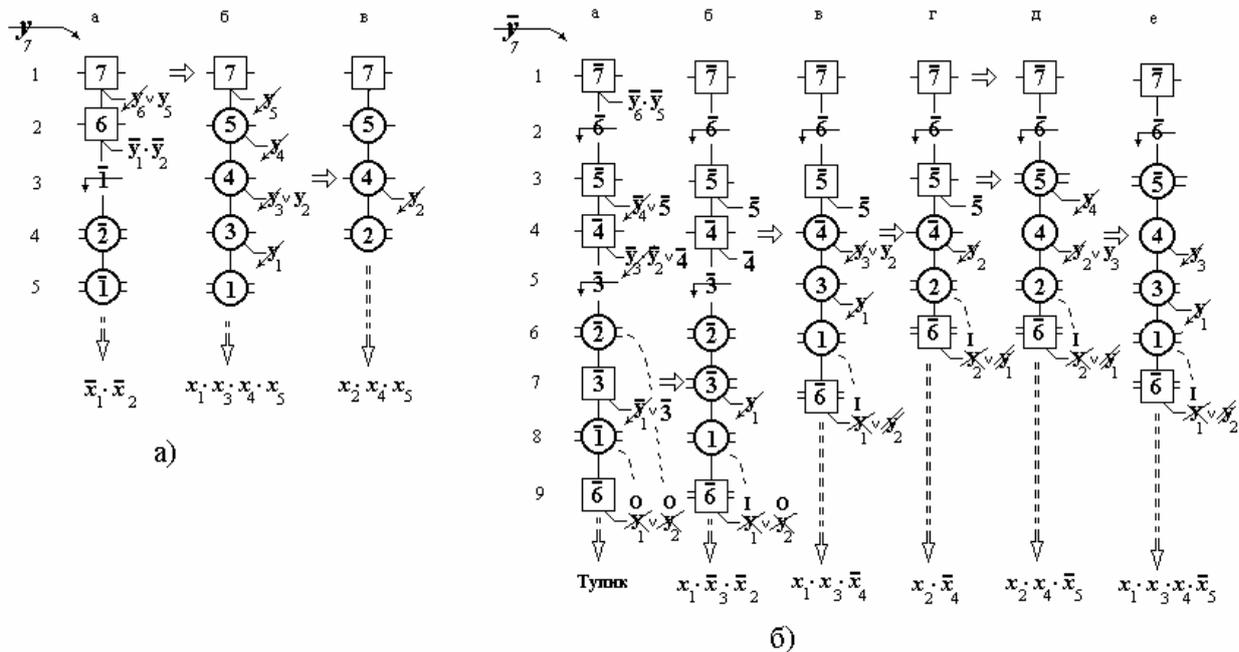


Рис. 17. Примеры деревьев решений системы логических уравнений (16)

Дерево решений на рис.17.а построено для критерия $Y_{\text{безопасности}} = y_7$ (17) и определяет логическую функцию безопасности (19) рассматриваемого участка ж.д. Дерево решений на рис.17.б построено по той же СФЦ, изображенной на рис.16 /4, но для противоположного (инверсного) критерия $Y_{\text{аварии}} = \bar{y}_7$ (18) и определяет логическую функцию (20) возникновения аварии.

Основные положения графоаналитического метода и программы представляются в виде следующего укрупненного алгоритма УГМ.

НАЧАЛО алгоритма УГМ

1. *Обработка ЛКФ.* Из ЛКФ очередная слева конъюнкция интегративных функций \tilde{y}_i переписывается в очередной новый столбец дерева решений, в виде последовательности исходных узлов (см. табл.3, п.1), и далее выполняется п.2. Если в ЛКФ конъюнкций больше нет, то построение дерева решений завершено и осуществляется переход к п.9 алгоритма.

2. *Формирование функции обеспечения.* В столбце дерева решений первый снизу исходный узел принимается к раскрытию и обводится кружком или квадратом (см. табл.3, п.2, 3). На ответвлении узла записывается функция обеспечения (ФО). Для головных вершин СФЦ ФО считается равной 1 (логической единице). Для принятых к раскрытию прямых интегративных функций y_i , ФО включает в себя правые части логических уравнений (16 /1), без простых переменных \tilde{x}_i (см., например, рис.17.а, фрагменты дерева а.1, а.2, б.3). Для принятых к раскрытию инверсных интегративных функций \bar{y}_i функциональных вершин СФЦ, признак собственной инверсии записывается в ФО последним справа (см., например, рис.17.б, фрагменты а.4, а.7).

3. *Обработка функции обеспечения.* Все составляющие ФО проверяются на цикличность, раскрытость и логические противоречия по правилам, которые соответствуют законам алгебры логики, способам учета групп несовместных событий и логических последовательностей. В ходе проверки циклические и противоречивые интегративные функции \tilde{y}_i в ФО заменяются логическими нулями (см. рис.17.б, фрагменты а.9, б.9). Раскрытые интегративные функции \tilde{y}_i в ФО заменяются логическими единицами (см. рис.17.б, фрагменты б.9, в.7, г.6, д.6, е.7). Затем ФО преобразуется по законам алгебры логики. Если ФО стала равна логическому нулю (см. рис.17.б, фрагмент а.9), то построение столбца прекращается (ситуация "Тупик") и осуществляется переход к п.8. алгоритма. Если ФО стала равной логической единице, то раскрываемый узел дерева решений переводится в

собственно раскрытый (см. табл.3, п.4, 5) и далее выполняется п.5. алгоритма. Во всех других случаях выполняется переход к п.4. алгоритма.

4. *Смещение конъюнкции ФО.* Из ФО выбирается первая слева конъюнкция интегральных функций \tilde{y}_i и переписывается в конец текущего столбца дерева решений, в виде последовательности исходных узлов (на рис.17.а и рис.17.б все смещаемые конъюнкции перечеркнуты стрелками). Далее выполняется п.2 алгоритма (главный цикл).

5. *Преобразование столбца по собственно раскрытому узлу.* Все вышестоящие узлы столбца последовательно (снизу вверх) преобразуются по следующим правилам. Собственно раскрытые, раскрытые по обеспечению и смещенные узлы (см. табл.3) пропускаются. Принятые к раскрытию действительные и условные узлы переводятся в раскрытые по обеспечению (см. табл.3, п.6, 7). Если преобразована вся вышестоящая часть столбца, то построение очередной конъюнкции ФРС завершено и осуществляется переход к п.7. Если в процессе преобразования встретился исходный узел, то далее выполняется п.6.

6. *Обработка исходного узла.* Если нижний собственно раскрытый узел столбца соответствует головной вершине СФЦ, то встретившийся исходный узел зачеркивается угловой стрелкой (см. табл.3, п. 8) и переписывается в нижнюю часть текущего столбца дерева решений (см. рис.17.а, фрагмент а.3). Затем выполняется п.2. алгоритма. Если же нижний собственно раскрытый узел столбца инвертирован и не соответствует головной вершине СФЦ, то для этого узла формируется прямая ФО (см. рис.17.б, фрагменты в.4, д.3) и далее выполняется п.3 алгоритма.

7. *Считывание конъюнкции.* Сформированная в столбце очередная конъюнкция искомой ФРС содержит логические переменные, номера которых указаны к действительных узлах (см. табл.3 п. 4, 6). На рис.17.а и рис.17.б под каждым столбцом записаны (см. пунктирные стрелки вниз) конъюнкции ФРС безопасности и аварии. Далее выполняется п. 8.

8. *Поиск ответвлений.* Узлы текущего столбца дерева решений просматриваются последовательно, снизу вверх. Те узлы, у которых нет ФО, удаляются и, соответственно, восстанавливаются предыдущие уровни раскрытия узлов вышестоящей части столбца. Если удалены все узлы (ответвлений не найдено), то выполняется к п.1. алгоритма. Если обнаружено первое снизу ответвление (на рис.17.а и рис.17.б они отмечены горизонтальными стрелками направо), то выполняется п. 4 алгоритма.

9. *Преобразование ФРС.* Выполняются преобразования полученной ФРС в целях ее приведение к форме, удобной для дальнейшего применения, например, минимизируется, что позволяет представить КПУФ или МСО исследуемой системы.

КОНЕЦ алгоритма УГМ.

2.1.5. Вероятностное моделирование в ПК АСМ СЗМА

На рис.18 изображена общая схема этапа определения многочлена вероятностной функции в ПК АСМ СЗМА.

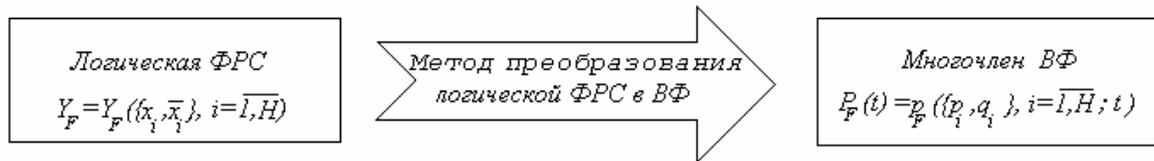


Рис. 18. Схема этапа определения ВФ

Построение расчетного многочлена вероятностной функции выполняется в ПК АСМ СЗМА специальной программой библиотеки ЛОГ@ВФ. С ее помощью осуществляется прямое преобразование полученной на предыдущем этапе логической ФРС исследуемой системы в расчетный многочлен вероятностной функции

$$Y_F(\{x_i, \bar{x}_i\}, i = 1, 2, \dots, H) \Rightarrow P_F(t) = P_F(\{p_i, q_i\}, i = 1, 2, \dots, H; t). \quad (21)$$

В библиотеке ЛОГ@ВФ ПК АСМ СЗМА программа построения многочлена вероятностной функции построена на основе, так называемого комбинированного метода преобразования логических ФРС в многочлены ВФ [5, 27].

Алгоритмическая схема комбинированного метода построения точного многочлена расчетной вероятностной функции

На этапе вероятностного моделирования в ОЛВМ автоматизированы процессы построения нескольких видов расчетных моделей – аналитических, Марковских, статистических и сетевых. В ПК АСМ СЗМА реализован комбинированный метод преобразования логической ФРС в многочлен расчетной вероятностной функции [5, 7, 13, 27, 29, 40]. Укрупненная структурная схема алгоритма комбинированного метода приведена на следующем рисунке.



Рис. 19. Алгоритм комбинированного метода определения ВФ

Задача определения ВФ состоит в преобразовании логической ФРС в многочлен вероятностной функции следующего вида

$$Y_c = Y_c(\{x_i, \bar{x}_i\}, i=1, 2, \dots, N) \Rightarrow P_c(\{P_i, Q_i\}, i=1, 2, \dots, N)$$

Для точного решения этой задачи комбинированным методом производятся, в общем случае, два вида преобразований исходной ФРС Y_c . Сначала осуществляется квазиортогонализация по одной логической переменной, а затем выполняется символичный переход к многочлену искомой ВФ. При допущении о независимости в совокупности всех элементарных бинарных событий $\tilde{x}_i, i=1, 2, \dots, N$ правила выполнения этих двух этапов определяются следующими положениями.

Правила квазиортогонализации ФРС по одной переменной

В качестве примера рассматриваются две логические функции, полученные на предыдущем этапе логического моделирования.

$$Y_{\text{безопасности}} = y_7 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (22)$$

$$Y_{\text{аварии}} = \bar{y}_7 = x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \quad (23)$$

Все пары неортогональных конъюнкций ФРС сначала проверяются на возможность их ортогонализации по следующему закону [5, 29]

$$\gamma \cdot \tilde{x}_i \vee \gamma \cdot \varphi = \gamma \cdot x_i \vee \gamma \cdot \overline{\tilde{x}_i} \quad (24)$$

Здесь γ и φ части проверяемых конъюнкций, в которых отсутствует переменная \tilde{x}_i . Ортогонализирующее преобразование (24) не увеличивает общего числа конъюнкций исходной ФРС. После выполнения указанных преобразований функции (22) и (23), получаем:

$$\begin{aligned} Y_{\text{безопасности}} = y_7 &= \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 = \\ &= \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot \overline{x_2} \vee x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} Y_{\text{аварии}} = \overline{y_7} &= x_1 \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_2} \vee x_1 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} \vee x_2 \cdot \overline{x_4} \vee x_2 \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} = \\ &= x_1 \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_2} \vee x_1 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_2} \vee x_2 \cdot \overline{x_4} \vee x_2 \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} \cdot \overline{x_2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Правила символьного перехода к многочлену вероятностной функции

Логическая ФРС здесь рассматривается как строгая аналитическая форма определения того сложного случайного события, вероятность которого надо правильно рассчитать с помощью искомой ВФ. В указанном смысле операция конъюнкции представляет произведение, дизъюнкция - сумму, а инверсия - дополнение простых случайных событий, вероятностные параметры которых известны. Поэтому для получения многочлена ВФ достаточно выполнить символьные преобразования обозначений логических переменных и операций в обозначения вероятностных переменных и арифметических операций в точном соответствии с законами теории вероятностей. Полный набор таких правил символьного перехода от ФРС к ВФ приведен в следующем рисунке.

1. Преобразование переменных	2. Преобразование конъюнкций	3. Преобразование дизъюнкций	4. Преобразование инверсий
$x_i \Rightarrow P_i$ $\overline{x_i} \Rightarrow \overline{P_i}$	$\tilde{f}_j \cdot \tilde{f}_k \Rightarrow \begin{cases} \tilde{f}_j & \text{при } j=k, \sim_j = \sim_k \\ 0 & \text{при } j=k, \sim_j \neq \sim_k \\ \tilde{f}_j \cdot \tilde{f}_k & \text{при } j \neq k \end{cases}$	$\tilde{f}_j \vee \tilde{f}_k \Rightarrow \begin{cases} \tilde{f}_j & \text{при } j=k, \sim_j = \sim_k \\ 1 & \text{при } j=k, \sim_j \neq \sim_k \\ \tilde{f}_j + \tilde{f}_k - \tilde{f}_j \cdot \tilde{f}_k & \text{при } j \neq k \end{cases}$	$\overline{P_i} \Rightarrow Q_i = 1 - P_i$ $\overline{\tilde{f}_j} \Rightarrow 1 - \tilde{f}_j$

Рис. 20. Правила символьного преобразования ФРС в ВФ

При полной ортогональности ФРС указанные символные преобразования точно совпадают с известными правилами прямого замещения [30]. Преобразуя по указанным правилам ФРС (25) и (26) в многочлены ВФ, получаем:

Вероятность безопасности -

$$P_{\text{безопасности}} = P\{y_7\} = Q_1Q_2 + P_1P_3P_4P_5Q_2 + P_2P_4P_5; \quad (27)$$

Вероятность аварии -

$$P_{\text{аварии}} = P\{\bar{y}_7\} = P_1Q_3Q_2 + P_1P_3Q_4Q_2 + P_2Q_4 + P_2P_4Q_5 + P_1P_3P_4Q_5Q_2. \quad (28)$$

В ОЛВМ с помощью методов учета ГНС [40] реализована возможность использования в моделях надежности, безопасности и риска систем элементов с произвольным числом собственных состояний и стохастическими зависимостями. При этом изменяются некоторые законы алгебры логики и правила построения многочленов вероятностных функций [7, 40, 60].

2.1.6. Выполнение расчетов в ПК АСМ СЗМА

Обобщенная схема завершающего четвертого этапа расчета вероятностных показателей в ПК АСМ СЗМА приведена на Рис.21.

В правой части этого рисунка приведены основные вероятностные показатели, вычисляемые в ПК АСМ СЗМА в режимах "Статические расчеты" и "Вероятностно-временные расчеты" для оценки надежности и безопасности систем на основе автоматически формируемых многочленов вероятностных функций.

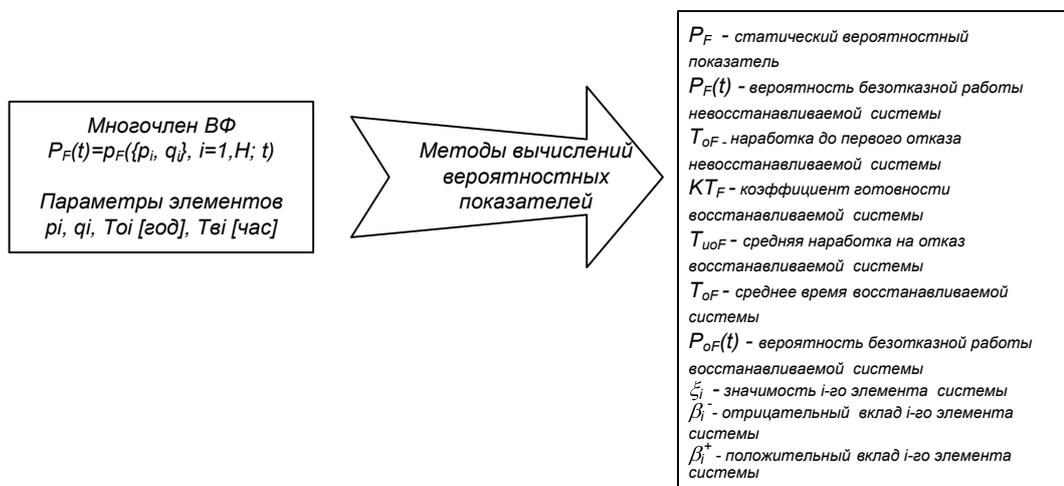


Рис. 21. Схема этапа вычисления вероятностных показателей в ПК АСМ СЗМА

2.1.6.1. Расчет статических вероятностных показателей систем

Для выполнения статических расчетов в ПК АСМ СЗМА на этапе постановки задачи должны быть заданы в явном виде вероятности исходов p_i , $i = 1, 2, \dots, N$ всех элементарных событий, которые представлены в СФЦ системы функциональными вершинами. Смысловое содержание этих вероятностей определяет пользователь ПК АСМ СЗМА в процессе разработки СФЦ системы. Это могут быть вероятности безотказной работы или отказа элементов, коэффициенты их готовности или неготовности, вероятности срабатывания или несрабатывания на запрос и т.п. После ввода этих параметров и установки режима "Статические расчеты" ПК АСМ СЗМА (на основе многочлена ВФ и заданных статических параметров элементов) выполняет расчет соответствующей статической вероятности P_F исследуемой системы в целом. Смысловое содержание этой характеристики соответствует виду подготовленной пользователем СФЦ и всегда определяет вероятность реализации заданного логического критерия функционирования системы.

Правила ввода статических вероятностных показателей элементов системы в ПК АСМ СЗМА приведены в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §5).

2.1.6.2. Расчет показателей безотказности невосстанавливаемых систем

Невосстанавливаемыми считаются системные объекты, в которых на рассматриваемом интервале времени t функционирования все элементы $i = 1, 2, \dots, N$ могут независимо отказывать с интенсивностью $\lambda_i = 1/T_{oi}$ [1/год], но ни один из этих элементов после отказа не восстанавливается. Расчеты показателей безотказности невосстанавливаемых систем выполняются в ПК АСМ СЗМА при включении режима "Вероятностно-временные расчеты".

Расчет вероятности безотказной работы

Исходными данными для расчета этого показателя являются:

- многочлен $P_F(t)$ вероятности безотказной работы рассматриваемого режима F функционирования исследуемой системы (21);
- числовые значения средней наработки до отказа T_{oi} всех элементов $i = 1, 2, \dots, H$ системы в годах;
- время t функционирования системы (наработка системы).

Сначала ПК АСМ СЗМА выполняет расчеты вероятностей безотказной работы и отказа всех элементов системы для экспоненциального закона распределения времени их безотказной работы

$$\begin{aligned} p_i(t) &= e^{-\frac{1}{T_i}t}; \\ q_i(t) &= 1 - p_i(t). \end{aligned} \quad (29)$$

Подставляя аналитические выражения (29) в многочлен ВФ, получаем закон распределения времени безотказной работы системы по реализации функции F . На основе этого многочлена ПК АСМ СЗМА выполняет расчеты вероятности безотказной работы системы для заданной наработки t .

Расчет средней наработки до отказа

Аналитическое решение этой задачи связано с нахождением интеграла от многочлена (21) вероятностной функции надежности системы:

$$T_{oF} = \int_0^{\infty} P_F(t) dt; \quad (30)$$

Если многочлен (21) представлен в прямой форме (без использования параметра $q_i(t)$), то интеграл (30) для экспоненциального закона берется непосредственно в общем виде, и соответствующая расчетная формула средней наработки до первого отказа составляет

$$T_{oF} = \sum_{j=1}^M (3H_j) \frac{1}{\sum_{i \in K_j} \frac{1}{T_{oi}}} \quad (31)$$

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

Правила ввода параметров T_{oi} и t для расчета в ПК АСМ СЗМА показателей надежности невосстанавливаемых систем приведены в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §5).

2.1.6.3. Расчет показателей безотказности восстанавливаемых систем

Рассматриваются такие восстанавливаемые системы, в которых все элементы, $i = 1, 2, \dots, H$, могут независимо отказывать с заданной интенсивностью $\lambda_i(t) = \lambda_i = const$ и неограниченно восстанавливаться (т.е. переходить в состояние работоспособности) с заданной интенсивностью восстановления $\mu_i(t) = \mu_i = const$. Вычисления показателей безотказности восстанавливаемых систем производятся ПК АСМ СЗМА, при включении режима "Вероятностно-временные расчеты".

Расчет коэффициентов готовности элементов

В ПК АСМ СЗМА надежность элементов в восстанавливаемой системе характеризуется двумя параметрами

$$T_{oi} = \frac{1}{\lambda_i}; \quad T_{ei} = \frac{1}{\mu_i}. \quad (32)$$

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

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

$$K\Gamma_i = \frac{T_{oi}}{T_{oi} + T_{ei}} = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (33)$$

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

Расчет коэффициента готовности восстанавливаемой системы

В ПК АСМ СЗМА вычисление коэффициента готовности системы выполняется на основе многочлена вероятностной функции P_F и двух видов параметров надежности всех элементов:

- средней наработки до отказа T_{oi} [год];
- среднего времени восстановления T_{ei} [час].

После этого ПК АСМ СЗМА автоматически рассчитывает значения коэффициентов готовности элементов $p_i = K\Gamma_i$, и на основе многочлена ВФ производит вычисление значения коэффициента готовности $K\Gamma_F$ системы. Этот показатель вычисляется как для монотонных, так и для немонотонных моделей исследуемых системных объектов.

Ограничения: Данная методика расчета $KГ_F$ правомерна, если допустима гипотеза о независимости отказов и неограниченности восстановлений всех элементов исследуемой системы.

Расчет средней наработки на отказ и среднего времени восстановления

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

В ПК АСМ СЗМА для расчета указанных показателей применяются известные и новые приближенные аналитические методы [28, 29]:

$$T_{ноF} = KГ_F * \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^H \frac{\partial KГ_F}{\partial KГ_i} * \lambda_i * KГ_i} \right) \quad (34)$$

$$T_{вF} = (1 - KГ_F) * \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^H \frac{\partial KГ_F}{\partial KГ_i} * \lambda_i * KГ_i} \right) \quad (35)$$

Расчет вероятности безотказной работы восстанавливаемой системы

В основе расчета этой характеристики лежат следующие допущения:

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

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{1}{T_{ноF} + T_{вF}}.$$

В этом случае приближенный расчет вероятности первого отказа восстанавливаемой системы выполняется по известной формуле для экспоненциального закона

$$P_{\text{сF}}(t) = e^{-\lambda_{\text{сF}} t} = e^{-\frac{1}{T_{\text{нoF}} + T_{\text{сF}}} t} \quad (36)$$

Ограничения: Показатели $T_{\text{нoF}}$, $T_{\text{сF}}$ и $P_{\text{сF}}(t)$ вычисляются в ПК АСМ СЗМА только для прямых монотонных моделей работоспособности восстанавливаемых систем. Коэффициент готовности (или неготовности) вычисляется для всех видов монотонных и немонотонных моделей систем.

Правила ввода параметров T_{Oi} , T_{Bi} и t для расчета в ПК АСМ СЗМА показателей надежности восстанавливаемых систем приведены в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §5).

2.1.6.4. Расчет вероятностных характеристик смешанных систем

Смешанными считаются системы, в которых часть элементов является восстанавливаемыми, а другая часть элементов – невозстанавливаемыми. В ПК АСМ СЗМА в качестве показателя надежности такой системы вычисляется **вероятность готовности** смешанной системы $PK\Gamma_{\text{F}}(t)$ [29].

Вычисление этого показателя осуществляется по следующим правилам:

- для элементов невозстанавливаемой части системы в качестве вероятностных параметров вычисляются вероятности их безотказной работы $p_i = p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ или отказа $q_i = q_i(t) = 1 - p_i(t)$;
- для элементов восстанавливаемой части системы в качестве параметров используются показатели их готовности $p_i = K\Gamma_i$ и неготовности $q_i = 1 - K\Gamma_i$.

Подставляя указанные параметры в многочлен ВФ, ПК АСМ СЗМА вычисляет вероятность готовности смешанной системы в целом

$$PK\Gamma_{\text{F}}(t) = p(\{p_i(t), q_i(t), K\Gamma_j, 1 - K\Gamma_j\}, i \in N, j \in W) \quad (37)$$

Здесь N — множество номеров невозстанавливаемых элементов, а W — множество номеров восстанавливаемых элементов смешанной системы.

По физическому смыслу $PK\Gamma_F(t)$ - это вероятность того, что, к моменту окончания периода времени t функционирования системы, существует хотя бы одна комбинация состояний работоспособности восстанавливаемых элементов и безотказной работы невосстанавливаемых элементов, которая обеспечивает работоспособность этой системы в целом. Таким образом, по своему определению характеристика $PK\Gamma_F(t)$ занимает промежуточное положение между показателями ее готовности $K\Gamma_F$, если все элементы восстанавливаются, и вероятностью безотказной работы $P_F(t)$, если все элементы невосстанавливаемые. Одновременно ПК АСМ СЗМА вычисляет значимости и вклады всех элементов в показатель вероятности готовности смешанной системы.

2.1.6.5. Расчет значимостей и вкладов элементов

В базовой версии ПК АСМ СЗМА показатели значимости и вкладов элементов (базисных событий) вычисляются в режимах статических и вероятностно-временных расчетов на основе логико-вероятностных методов их определения [29, 30]. Реализованы вычисления трех показателей роли элементов в обеспечении надежности и безопасности исследуемых систем – значимости, положительного и отрицательного вкладов [29].

Расчет значимости элементов системы

Расчет показателя значимости ξ_i отдельного элемента i исследуемой системы выполняется в ПК АСМ СЗМА на основе следующего соотношения:

$$\xi_i = \frac{P_F}{p_i} \Big|_{p_i=1} - \frac{P_F}{p_i} \Big|_{p_i=0} ; i=1,2,\dots,H \quad (38)$$

Здесь $\frac{P_F}{p_i} \Big|_{p_i=1}$ - значение вероятностной характеристики системы при абсолютной надежности элемента i , а $\frac{P_F}{p_i} \Big|_{p_i=0}$ - при достоверном отказе элемента i на рассматриваемом интервале t времени функционирования. Это означает, что:

1. Величина значимости ξ_i точно равна изменению значения системной характеристики P_F вследствие изменения собственного параметра p_i от 0 до 1, и при фиксированных значениях параметров всех других элементов системы;
2. Диапазон значений вероятностного показателя значимости ξ_i составляет $[-1, 0, +1]$ включительно;
3. Отрицательное значение $\xi_i < 0$ характеризует, так называемое, вредное (понижающее) влияние элемента i на вероятность реализации заданного режима работы системы. В этом случае, например, увеличение надежности самого элемента i , безусловно, приводит к уменьшению надежности P_C всей системы в целом, а точнее – рассматриваемого режима ее функционирования. Отрицательные значимости элементов характерны для немонотонных логико-вероятностных моделей систем;
4. Нулевое значение характеристики значимости $\xi_i = 0$ говорит о том, что данный элемент i является несущественным для реализации рассматриваемого режима функционирования системы в целом (элемент i лишний, ненужный);
5. Положительное значение $\xi_i > 0$ определяет то максимально возможное увеличение надежности P_F систем, которое она может получить, если изменить надежность только одного элемента i от нуля до единицы включительно;
6. Все элементы монотонных систем могут иметь только положительные или нулевые значения характеристик их значимости;
7. Для случая, когда процессы отказов (или отказов и восстановлений) всех элементов системы являются независимыми в совокупности, значимости (38) элементов системы равны соответствующим частным производным

$$\xi_i = \frac{\partial P_F}{\partial p_i}, \quad i = 1, 2, \dots, H. \quad (39)$$

Положительные и отрицательные вклады элементов системы

Наряду с характеристиками значимости в ПК АСМ СЗМА вычисляются показатели положительного β_i^+ и отрицательного β_i^- вкладов всех элементов.

Положительный вклад β_i^+ показывает насколько изменится системный показатель P_F , при изменении только одного параметра p_i элемента i , исследуемой системы, от его текущего значения p_i до 1.0 включительно

$$\beta_i^+ = \frac{P_F}{p_i} - P_F \quad (40)$$

Отрицательный вклад β_i^- показывает, насколько изменится системный показатель P_F при изменении только одного параметра p_i элемента i от его текущего значения (p_i) до 0.0, взятый с противоположным знаком.

$$\beta_i^- = -(P_F - \frac{P_F}{p_i} = 0) \quad (41)$$

В отличие от показателя положительного вклада (40), при расчете показателя отрицательного вклада (41) принудительное изменение знака выполняется для того, чтобы во всех показателях роли элементов положительные значения характеристик всегда означали увеличение P_F при соответствующих изменениях p_i от 0 до 1, для ξ_i , от p_i до 1, для β_i^+ и от p_i до 0 для β_i^- , и наоборот.

2.1.7. Учет стохастически зависимых событий

В ПК АСМ СЗМА реализована возможность учета некоторых видов стохастических зависимостей между событиями безотказной работы и/или отказов групп элементов, которые могут быть корректно представлены с помощью разработанного в ОЛВМ аппарата групп несовместных событий (ГНС) [7, 40, 60]. При этом изменяются некоторые законы алгебры логики и правила построения многочленов вероятностных функций. Так, например, если несовместными являются прямые исходы группы из двух элементарных событий $x_i \cdot x_k = 0$, новые законы алгебры логики и соответствующие правила вычисления вероятностей составляют:

$$\bar{x}_l \vee \bar{x}_k = I; \quad \bar{x}_l \cdot x_k = x_k; \quad x_l \vee \bar{x}_k = \bar{x}_k. \quad (42)$$

$$p\{\bar{x}_l \vee \bar{x}_k\} = 1; \quad p\{\bar{x}_l \cdot x_k\} = p_k; \quad p\{x_l \vee \bar{x}_k\} = q_k; \quad (43)$$

$$p\{x_j \vee x_k\} = p_l + p_k; \quad p\{\bar{x}_l \cdot \bar{x}_k\} = 1 - (p_l + p_k).$$

Для учета ГНС в ПК АСМ СЗМА вводятся следующие исходные данные:

- признаки объединения множеств элементов в группы несовместных событий;
- признаки исходов (прямой или инверсный) элементарных событий, которые являются несовместными в ГНС;
- статические вероятностные параметры событий, входящих в ГНС, задаваемые с учетом нормирующего условия

$$\sum_{l \in \text{ГНС}} \tilde{p}_l \leq 1.0 \quad (44)$$

Здесь \tilde{p}_l — вероятности суммируемых несовместных исходов всех элементов, входящих в ГНС.

Количество групп несовместных событий, используемых в одном проекте, неограниченно. Правила ввода признаков ГНС в ПК АСМ СЗМА приведены в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §5).

2.1.8. Учет собственного времени работы элементов

В режиме "Вероятностно-временные расчеты" ПК АСМ СЗМА позволяет для каждого элемента исследуемой системы задать собственное время t_{ri} его работы (собственную наработку) и установить признак "Учет времени работы элементов" на панели режимов моделирования и расчетов (см. Рис. 2 п.5). В этом случае при выполнении расчетов вероятностно-временных характеристик системы автоматически учитывается заданное собственное время t_{ri} работы элементов, если оно меньше заданной общей наработки t исследуемой системы в целом ($t_{ri} < t$).

Правила ввода параметров собственного времени работы элементов в ПК АСМ СЗМА приведены в Инструкции пользователя (приложение 3, §5 и §6).

2.1.9. Использование кратных вершин

В ПК АСМ СЗМА реализована возможность с помощью любой функциональной вершины i представлять два стандартных вида подсистем, состоящих из нескольких однотипных элементов. Для этого используется специальный параметр "**Кратн.**" (кратность) функциональной вершины СФЦ. В ПК АСМ СЗМА по умолчанию значение этого параметра устанавливается равным "0", которое означает, что данный элемент систем является обычным (одиночным) с заданными собственными вероятностными характеристиками. Если этому параметру функциональной вершины i задается положительное целочисленное значение $+K_R$, это означает, что соответствующая функциональная вершина СФЦ представляет подсистему из K_R однотипных элементов (с одинаковыми заданными вероятностными параметрами) функционирующую по конъюнктивной логике (все элементы объединены при помощи логического оператора "И"). Если параметру кратности функциональной вершины i задается отрицательное целочисленное значение $-K_R$, это означает, что подсистема, состоит из K_R однотипных элементов (с одинаковыми заданными вероятностными параметрами) и работает по дизъюнктивной логике (все элементы объединены при помощи логического оператора "ИЛИ").

Учет заданной кратности элементов в ПК АСМ СЗМА осуществляется автоматически путем предварительного расчета вероятностных характеристик соответствующих кратных подсистем и использования этих результатов в дальнейших расчетах показателей надежности или безопасности исследуемой системы в целом.

Правила ввода параметров кратности элементов в ПК АСМ СЗМА приведены в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §5).

2.1.10. Использование признаков законов распределения элементов

Признак закона распределения элементов устанавливается в столбце "Закон" таблицы параметров элементов (см. Рис. 2 п.5). В базовой версии ПК АСМ СЗМА реализованы два варианта использования этого признака.

1. В режиме "Вероятностно-временные расчеты" признак "Закон" может иметь следующие два значения:

- "0" – означает использование статического значения вероятностного параметра элемента (указанного в столбце P_i таблицы параметров);
- "1" – устанавливается по умолчанию и означает применение экспоненциальных законов распределения времени безотказной работы и времени восстановления элемента (значения параметров экспоненциальных законов элементов устанавливаются в столбцах T_{oi} и T_{vi} таблицы параметров элементов, см. Рис. 2 п.5).

2. В режиме "Приближенные вычисления" и включении параметра "Учет типов отказов", признак "Закон" определяет тип отказа соответствующего элемента (базисного события ДО), согласно методики [69], и может иметь следующие три значения:

- "800" – отказ на требование;
- "801" – отказ в режиме работы;
- "802" – скрытый отказ в режиме ожидания.

Правила ввода параметров "Закон" элементов в ПК АСМ СЗМА приведены в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §5).

2.1.11. Показатели, вычисляемые в режиме "Приближенные расчеты"

Это дополнительный вспомогательный режим работы ПК АСМ СЗМА, реализованный в ходе решения Контрольных примеров Секции №5 Совета по аттестации ПС (см. приложение 2). Все приближенные вычисления выполняются на основе усеченных или полных логических ФРС, представляющих минимальные сечения отказов исследуемых системных объектов.

В режиме приближенные расчеты и при выключенном признаке "Учет типов отказов" элементов, вычисления показателей ДО исследуемых систем осуществляются по методике, реализованной в ПК Saphire-7, и описанной в [70]. В этом случае с помощью ПК АСМ СЗМА, на основе заданных статических параметров элементов (базисных событий ДО), вычисляются следующие показатели:

- вероятности реализаций конъюнкций (МСО);
- значимости конъюнкций (МСО) по Fussell-Vesely;
- суммарные значимости конъюнкций (МСО) по Fussell-Vesely;
- вероятность реализации вершинного события ДО;
- значимости базисных событий по Fussell-Vesely;
- коэффициенты уменьшения риска базисных событий по Fussell-Vesely;
- коэффициенты увеличения риска базисных событий по Fussell-Vesely;
- число вхождений базисных событий в МСО усеченного или полного наборов.

В режиме приближенные расчеты и при включенном признаке "Учет типов отказов" элементов, вычисления показателей ДО исследуемых систем осуществляются по методике, реализованной в ПК "CRISS 4.0", и описанной в [69]. В этом случае с помощью ПК АСМ СЗМА, на основе заданных параметров трех типов отказов элементов (базисных событий ДО), вычисляются следующие показатели:

- вероятности базисных событий;
- вероятности МСО;
- значимости МСО по Fussell-Vesely;
- суммарные значимости МСО по Fussell-Vesely;
- вероятность реализации вершинного события.

Указанный набор вычисляемых ПК АСМ СЗМА приближенных значений вероятностных показателей соответствует только той части функциональностей ПК Saphire-7 и "CRISS 4.0", которые позволили в требуемом объеме решить выданные Контрольные примеры (см. приложение 2).

2.2. ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общая технология применения ПК АСМ СЗМА для автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета вероятностных показателей надежности и безопасности структурно-сложных систем определяется следующими основными положениями.

1. Подготавливается и вводится в ПК АСМ СЗМА схема функциональной целостности исследуемого свойства надежности и/или безопасности системы. Высокая логическая универсальность аппарата СФЦ позволяет пользователю сначала подготовить исходные структурные модели в форме типовых видов структурных схем, применяемых в других технологиях и программных комплексах автоматизированного структурного моделирования:

- блок схем, графов связности (ПК "Relex Software", США [22, 66]);
- деревьев отказов и деревьев событий (ПК "Relex Software", США [22, 66]; ПК "Risk Spectrum", Швеция, [23, 24, 25]; Код "RiskPuck", РФ [55], ПК "CRISS-3", "CRISS-4.0", РФ [56, 69], ПК Sapphire-7 [70]).

Затем эти формы структурных схем систем должны быть преобразованы к виду СФЦ и введены в ПК АСМ СЗМА. Правила реализации данного этапа в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, Глава II).

2. Определяются и вводятся в ПК АСМ СЗМА вероятностные и другие параметры элементов исследуемой системы, необходимые для выполнения этапов автоматизированного моделирования и расчетов показателей надежности и безопасности системы. Правила реализации данного этапа в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §5).

3. Задаются параметры требуемого режима моделирования, расчетов и представления результатов анализа системы в ПК АСМ СЗМА. Правила реализации данного этапа в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §6).

4. Формулируется и вводится в ПК АСМ СЗМА логический критерий функционирования, определяющий (совместно с СФЦ) исследуемое свойство (работо-

способности, отказа, безопасности, аварии, технического риска и т.п.) исследуемой системы. Правила реализации данного этапа в ПК АСМ СЗМА описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §7).

5. Осуществляется запуск подготовленного режима автоматического моделирования и расчетов ПК АСМ СЗМА. Правила этого этапа описаны в Инструкции пользователя (см. приложение 3, §8).

6. По окончании процесса автоматического моделирования и расчетов пользователь анализирует полученные результаты и либо использует их в дальнейшей работе, либо продолжает исследования с помощью ПК АСМ СЗМА, корректируя исходные данные и повторяя предыдущие этапы технологии АСМ.

2.2.1. Содержание формализованной постановки задачи

Главная особенность постановки задач в технологии АСМ заключается в более высокой (по сравнению с ручными технологиями) степени ее формализации. Это обусловлено тем, что по содержанию и форме информация, подготавливаемая на этапе постановки задачи, должна обеспечивать возможность применения конкретного образца программного комплекса, реализующего методы и средства технологии автоматизированного структурно-логического моделирования надежности или безопасности исследуемой системы.

Для эффективного применения ПК АСМ СЗМА на этапе формализованной постановки задачи пользователь должен выполнить следующие основные действия:

- Определить **цель исследования**, т.е. сформулировать в общем виде то свойство надежности или безопасности исследуемой системы, математические модели и вероятностные показатели которого должны быть определены с помощью ПК АСМ СЗМА;
- Обосновать **возможность применения технологии и ПК АСМ СЗМА** для вероятностного анализа надежности и/или безопасности исследуемого объекта. Здесь, в частности, должны быть учтены как функциональности, реализованные в базовом образце ПК АСМ СЗМА (см. §1.1 данного отчета), так и

существующие в настоящее время его ограничения и допущения (см. §1.3). Указанные ограничения и допущения не являются абсолютными. Они характеризуют только ту функциональность, которая реализована в заявленной к аттестации базовой версии ПК АСМ СЗМА (см. §1.1) . Многие из этих ограничений и допущений могут, и будут сниматься в ходе совершенствования теории, технологии АСМ и адаптации базовой ПК АСМ СЗМА к новым классам задач и предметным областям практического применения;

- Выбрать **прямой или обратный подход** к построению вероятностной модели исследуемой системы. Прямой подход предполагает, что будет разрабатываться и использоваться, например, модель безотказности или безаварийности рассматриваемой системы, а обратный подход предполагает, что будет разрабатываться и использоваться модель отказа или возникновения аварийной ситуации. При использовании прямой логики рассуждений (прямой подход) обычно формируется модель безотказности или безопасности системы. При использовании обратной логики рассуждений (обратного подхода) обычно строится структурная модель отказа или аварии. Может также иметь место **комбинированный подход** к построению СФЦ (смешанная логика прямых и обратных рассуждений). В этом случае, как правило, формируется немонотонная структурная модель исследуемой системы;
- Определить **состав вычисляемых показателей** выбранного свойства исследуемой системы. Это может быть, например:
 - количественная вероятностная оценка исследуемого свойства надежности или безопасности исследуемой системы (статическая вероятность реализации выбранного свойства, вероятность безотказной работы невосстанавливаемой системы, средняя наработка до отказа, коэффициент готовности системы, вероятность реализации заданной функции и др.), которая используется для определения степени ее соответствия заданному нормативному значению;

- оценка важности элементов или подсистем в решении задач повышения надежности объекта в целом или обоснования мероприятий по увеличению его безопасности, локализации и ликвидации аварийных ситуаций;
- распределение вероятностей реализации различных уровней последствий возможных вариантов развития аварий, на рассматриваемом объекте использования атомной энергии или ОПО.

Выбор вычисляемых показателей определяется целями анализа системы, функциональными возможностями ПК АСМ СЗМА и составом имеющихся исходных данных о параметрах элементов исследуемой системы;

- Разработать **схему функциональной целостности** и сформулировать один или несколько **логических критериев функционирования** исследуемого свойства надежности или безопасности системы, которые соответствуют цели исследования, особенностям рассматриваемого объекта, выбранному подходу к моделированию и составу вычисляемых показателей;
- Определить **вероятностные и другие параметры элементов** системы, представленных в СФЦ функциональными вершинами.

Наиболее важной и новой в технологии АСМ является разработка СФЦ исследуемого свойства надежности или безопасности рассматриваемой системы. Поэтому в следующем разделе отчета более подробно рассматриваются основные методические вопросы построения СФЦ структурно-сложных систем.

2.2.2. Методика построения СФЦ

2.2.2.1. Общие положения

В самом начале, еще перед непосредственной разработкой СФЦ, пользователю ПК АСМ СЗМА необходимо выполнить предварительный анализ системы. Он включает в себя уяснение (уточнение, конкретизацию) практической направленности (цели) планируемой работы по вероятностному анализу надежности или безопасности объекта и выбор подхода - прямого (модели работоспособности или

безопасности) или обратного (модели отказа или технического риска аварии), который будет использоваться при разработке СФЦ исследуемого свойства системы. Выбор того или иного подхода определяется, например, следующими положениями:

- если разработчик имеет опыт применения технологии и программных комплексов, основанных на деревьях отказов и событий (Risk Spectrum, Relex Tree, RISK, CRISS 4.0 и др.), то ему (на начальном этапе освоения технологии и ПК АСМ СЗМА) возможно, будет удобнее разрабатывать СФЦ, эквивалентные деревьям отказов и событий, т.е. применять обратный подход;
- если разработчик имеет опыт применения технологий, основанных на блок-схемах или графах связности и соответствующих программных комплексов (например, Relex RBD, КОК, RAY и др.), то ему, может быть, удобнее будет разрабатывать СФЦ эквивалентные блок-схемам и графам связности, т.е. применять прямой подход;
- после освоения технологии и ПК АСМ СЗМА выбор того или иного (прямого, обратного или комбинированного) подхода, для построения СФЦ, выполняется пользователем осознанно, исходя из соображений удобства, простоты построения структурной модели, точности, размерности и необходимых трудозатрат;
- в целях самоконтроля правильности постановки задачи бывает полезно в ходе исследования системы использовать и прямой и обратный подходы для ее анализа (в обоих случаях результаты моделирования расчетов, формируемые ПК АСМ СЗМА, должны быть полностью сопоставимыми и согласованными).

Построение схемы функциональной целостности является основой постановки задачи анализа надежности или безопасности (технического риска) системы в технологии АСМ. Как и любая другая постановочная задача, построение СФЦ, в своей главной содержательной части, является сугубо творческим, неформальным и, следовательно, абсолютно неалгоритмизируемым процессом. Интерфейс пользователя ПК АСМ СЗМА в плане подготовки СФЦ выполняет толь-

ко сервисные, обеспечивающие функции ее наглядного графического отображения и ввода в программный комплекс.

В структурной постановке задачи (разработке СФЦ) должны обязательно принимать участие профессиональные специалисты той предметной области, к которой относится вид и класс исследуемого системного объекта. Только их глубокие профессиональные знания исследуемой системы могут обеспечить правильность построения СФЦ, т.е. учет наиболее существенных факторов, влияющих на надежность и/или безопасность рассматриваемого объекта в целом.

Для обеспечения корректности построения СФЦ и наиболее эффективной реализации всех возможностей технологии и ПК АСМ СЗМА, специалисты предметной области должны знать основы теории ОЛВМ и функциональные возможности ПК АСМ СЗМА. В необходимой степени эти вопросы были изложены в предыдущих разделах верификационного отчета.

2.2.2.2. Этапы построения СФЦ

Общую методику построение СФЦ можно разделить на следующие три основные этапа:

1. Выделение из системы конечного множества простых элементов и подсистем, собственные состояния и взаимосвязи которых существенно влияют на исследуемое свойство надежности и/или безопасности рассматриваемого объекта в целом. Простые элементы представляются функциональными, а односвязные подсистемы эквивалентированными вершинами разрабатываемой СФЦ.

2. Определение и графическое представление логических условий реализации каждым элементом основной системы и декомпозированных подсистем своих выходных функций и представление этих условий в разрабатываемой СФЦ с помощью исходящих и заходящих, прямых и инверсных дуг связей функционального подчинения.

3. Проверка полноты и правильности построения основной СФЦ и СФЦ декомпозированных подсистем. В ходе проверки возможны многократные возвраты

и корректировки первых двух этапов данной методики построения СФЦ исследуемой системы.

Важное место в общей методике построения СФЦ играет определение числа и состава простых элементов и односвязных декомпозируемых подсистем, которые представляются в СФЦ функциональными и эквивалентированными вершинами. Если число элементов (вершин) небольшое, то СФЦ построить проще и быстрее, но при этом может оказаться недостаточной точность моделирования и расчетов. Если в целях повышения точности моделирования увеличивается число вершин СФЦ, то может существенно (экспоненциально) возрасти размерность автоматически формируемых математических моделей. Это может вызвать проблемы, связанные с возрастанием времени, требуемого на моделирование и расчеты, и затратами оперативной памяти ЭВМ. Искусство выделения достаточного числа элементов определяется опытом разработчиков СФЦ и постоянным сравнительным анализом различных вариантов структурного описания исследуемых свойств надежности и безопасности системы.

Функциональные возможности ПК АСМ СЗМА позволяют разрабатывать основную СФЦ, содержащую до 400 вершин (первый уровень декомпозиции). При анализе систем большей размерности рекомендуется использовать возможности аппарата кратностей функциональных вершин и средств двухуровневой односвязной структурной декомпозиции, реализованные в ПК АСМ СЗМА. Декомпозиция позволяет преобразовывать функциональные вершины основной СФЦ в эквивалентированные вершины и представлять каждую из них собственной СФЦ подсистемы второго уровня (вложенной СФЦ), содержащей до 100 вершин.

Для учета в моделях надежности и безопасности многофункциональных элементов или подсистем при построении СФЦ могут использоваться группы размноженных функциональных вершин. В этом случае должны обеспечиваться возможности записи ЛКФ по выходам отдельных размноженных вершин необходимо использовать дополнительные фиктивные вершины, согласно рассмотренных ранее соотношений вида (8).

Все выделяемые бинарные случайные события, представляемые в СФЦ функциональными вершинами, должны быть параметрически определяемыми и статистически устойчивыми. То есть при выборе элементов должна быть обеспечена возможность обоснованного задания (нахождения, определения, вычисления и др.) числовых значений их собственных вероятностных параметров. Это условие разрешимости проблемы исходных данных является общим для всех известных методов, технологий и программных средств вероятностного анализа структурно-сложных систем.

Для расчета параметров вершин СФЦ, представляющих высокоразмерные односвязные комбинаторные подсистемы K/N и групповые базовые события отказов, по общей причине, могут использоваться встроенные в ПК АСМ СЗМА вспомогательные расчетные утилиты (см. §1.2.6, §1.2.7, §1.2.8).

Для представления сложных логических отношений и повышения наглядности, в СФЦ могут вводиться фиктивные вершины, с помощью которых осуществляется необходимая группировка логических условий реализации функций группами элементов и подсистем исследуемого объекта.

Главный критерий полноты и завершенности структурного описания свойств надежности и/или безопасности (технического риска) системы заключается в том, что должны быть логически строго определены и представлены графическими средствами СФЦ, условия реализации прямых выходных функций каждой выделенной функциональной, фиктивной и эквивалентированной вершины. После этого построение структурной модели в форме СФЦ считается законченным.

Применение рассмотренных методических положений технологии АСМ иллюстрируется решением Тестовых задач и Контрольных примеров (см. приложение 1 и приложение 2).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЙ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ И КОНТРОЛЬНЫХ ПРИМЕРОВ

В соответствии с п.23 Положения об аттестации ПС [36] в данном разделе отчета о верификации приводится сопоставление результатов моделирования и расчетов показателей надежности и безопасности систем, полученных с помощью аттестуемой базовой версии ПК АСМ СЗМА с аналогичными результатами, полученными:

- ПК Risk Spectrum [23-25], аттестованного в НТЦ ЯРБ в 2003 г., используемого для вероятностного анализа безопасности АЭС;
- ПК "CRISS 4.0" [56, 69], аттестованного в НТЦ ЯРБ в 2006 г., используемого для моделирования и анализа систем безопасности и ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности;
- ПК Relex [21, 22, 66] и ПК Sapphire-7 [70], которые широко используются во многих странах для анализа надежности и безопасности сложных систем;
- с аналитическими решениями рассматриваемых примеров и задач, приведенными в тексте отчета или опубликованными в литературных источниках;
- с результатами теоретического анализа исследуемых процессов.

Дополнительно, для контроля согласованности и непротиворечивости результатов моделирования и расчетов, выполняемых ПК АСМ СЗМА, применяется способ сопоставления результатов прямого и обратного логико-вероятностного моделирования решаемых тестовых задач.

В полном объеме описания разработанных расчетных и аналитических тестов и выданных контрольных примеров приведены в приложениях 1 и 2 к настоящей заключительной редакции Отчета о верификации ПК АСМ СЗМА. В данном разделе изложены обобщенные результаты, выводы и заключения по решенным тестовым задачам и контрольным примерам.

3.1. Расчетный и аналитический Тест № 1. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СТЕНДА ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Справка. Задача разработана специалистами Межотраслевого экспертно-сертификационного, научно-технического и контрольного центра ядерной и радиационной безопасности (РЭСцентр, Санкт-Петербург) для стенда физических измерений (подкритического стенда), выполненного в соответствии с Методикой определения остаточного ресурса объектов использования атомной энергии [17]

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №1 приведено в приложении 1.

Исходная функциональная схема стенда физических измерений (СФИ) изображена на рис.22.

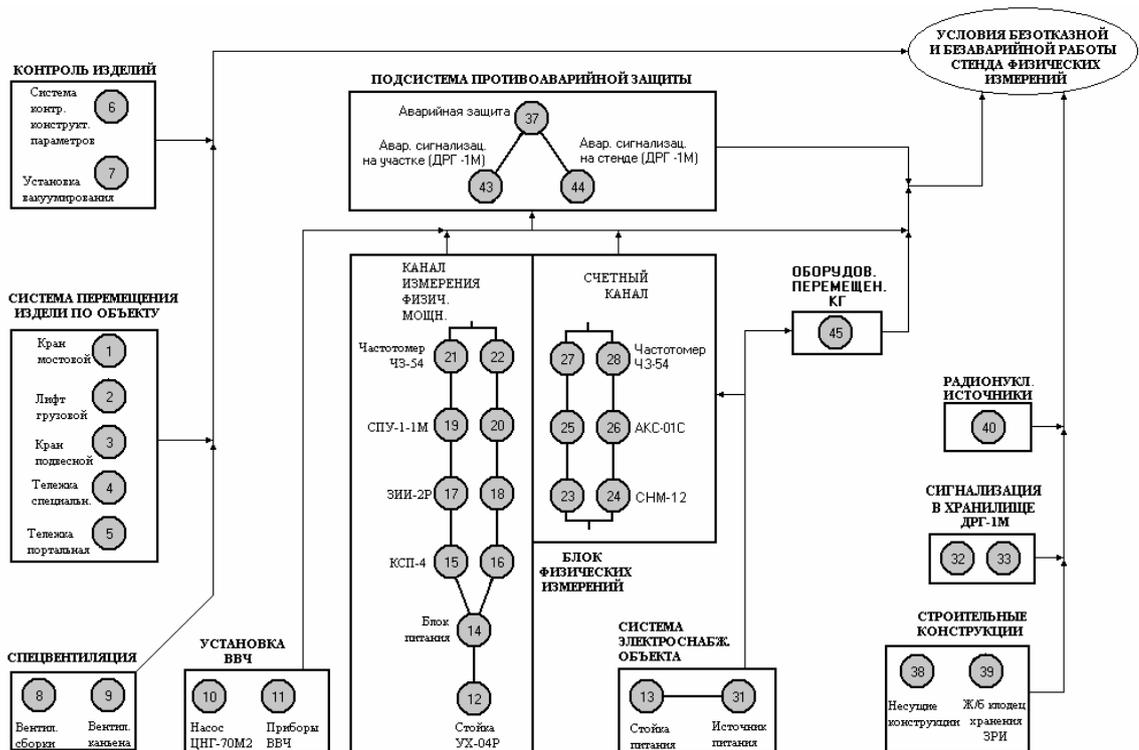


Рис. 22. Функциональная схема стенда физических измерений

На схеме представлены подсистемы, безотказная работа элементов которых (обозначены кружками), обеспечивает условия безотказного и безаварийного функционирования исследуемого СФИ.

В данном расчетно-аналитическом Тесте №1 решены следующие шесть примеров (12 задач):

- Пример 1.1. Моделирование и расчет вероятности безотказного функционирования и отказа СФИ (2 задачи);

- Пример 1.2. Моделирование и расчет вероятности возникновения и не возникновения проектной аварии СФИ (2 задачи);
- Пример 1.3. Моделирование и расчет вероятности возникновения и локализации (не возникновения или не локализации) запроектной аварийной ситуации СФИ (2 задачи);
- Пример 1.4. Моделирование и расчет вероятности возникновения и не возникновения запроектной аварии СФИ (2 задачи);
- Пример 1.5. Оценка мероприятий по снижению вероятности возникновения запроектной аварии СФИ (3 задачи);
- Пример 1.6. Учет собственного времени работы группы элементов СФИ (1 задача).

С помощью примеров данного Теста №1 подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ блок-схем свойств надежности и безопасности исследуемых систем;
- моделирование свойств надежности и безопасности;
- построение монотонных и немонотонных СФЦ;
- построение монотонных и немонотонных, прямых и обратных моделей надежности и безопасности;
- режим "Вероятностно-временные расчеты" показателей надежности и безопасности невосстанавливаемой системы;
- расчет показателей вероятности безотказной работы и отказа за заданную наработку, средней наработки до отказа, значимостей и вкладов элементов (по методике ОЛВМ);
- учет собственного времени работы элементов;
- односвязная двухуровневая структурная декомпозиция;
- использование аппарата кратностей.

Продемонстрированы возможности Комплекса на основе единой СФЦ и с помощью разных ЛКФ ставить и решать различные задачи автоматизированного моделирования и расчета показателей:

- надежности ОИАЭ (безотказности и отказа СФИ, пример 1.1);
- безопасности ОИАЭ (риска возникновения в СФИ проектной аварии, пример 1.2, возникновения и локализации запроектной аварийной ситуации, пример 1.3, вероятности возникновения запроектной аварии, пример 1.4);
- возможность использования показателей значимостей и вкладов элементов для обоснованной выработки решений и оценки эффективности мероприятий по увеличению безопасности (снижению риска) ОИАЭ, пример 1.5.

Корректность реализации в ПК АСМ СЗМА указанных функций и выполнение расчетов показателей подтверждена сопоставлением полученных машинных результатов с ручными аналитическими решениями (примеры 1.1, 1.2, 1.3, 1.6) и контролем непротиворечивости прямого и обратного моделирования (примеры 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.6).

Так как примеры 1.2 – 1.6 требуют построения немонотонных моделей безопасности СФИ, то другими известными технологиями и программными комплексами эти задачи в настоящее время не решаются.

3.2. Расчетный и аналитический Тест №2.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Справка. Рассматриваемая задача впервые разработана и аналитически решена основоположником отечественной научной школы логико-вероятностного моделирования академиком Рябининым И.А. [30-32]. Многие годы она является классическим тестовым примером, на котором проверяются практически все методы, методики и программные средства логико-вероятностного моделирования.

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №2 приведено в приложении 1.

Исходная функциональная схема системы электроснабжения (СЭС) изображена на рис.23.

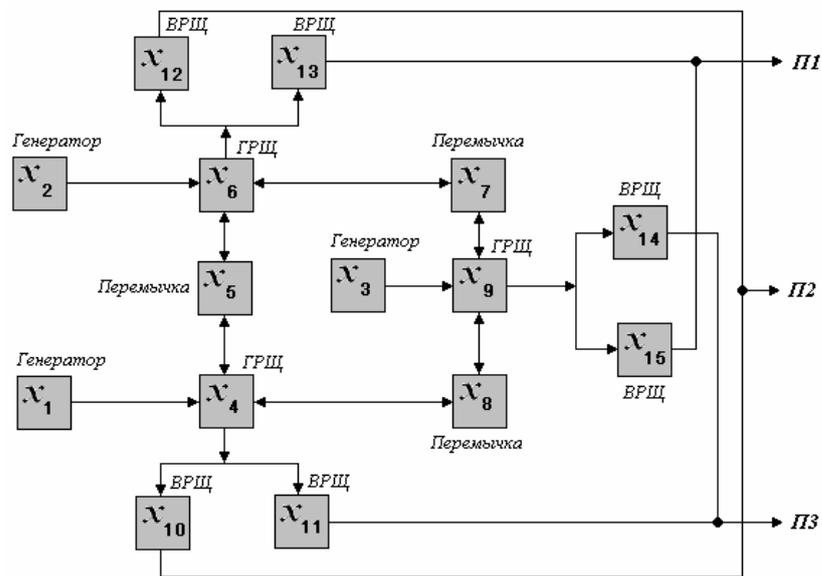


Рис. 23. Функциональная схема системы электроснабжения

Для тестирования ПК АСМ СЗМА решены семь примеров моделирования и расчетов вероятностных показателей различных режимов обеспечения питанием потребителей СЭС с варьированием значений параметров надежности элементов:

- Пример 2.1. Расчет вероятности обеспечения питанием СЭС всех трех потребителей при заданных вероятностях безотказной работы элементов, независимых от времени (3 задачи);
- Пример 2.2. Автоматическое определение списка минимальных путей обеспечения питанием СЭС одновременно всех трех потребителей (1 задача);

- Пример 2.3. Автоматическое определение списка минимальных сечений отказов СЭС, приводящих к не обеспечению питанием хотя бы одного из трех потребителей (1 задача);
- Пример 2.4. Расчет надежности невосстанавливаемой СЭС с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения (2 задачи);
- Пример 2.5. Расчет надежности восстанавливаемой СЭС с заданными средними наработками на отказ и восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения (2 задачи);
- Пример 2.6. Немонотонная модель функционирования СЭС (1 задача);
- Пример 2.7. Расчет смешанной СЭС с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами (4 задачи).

С помощью примеров данного теста подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ графов связности с множественными циклическими (мостиковыми) связями элементов;
- моделирование свойств надежности;
- построение монотонных и немонотонных, прямых и обратных моделей;
- режимы "Статические расчеты" и "Вероятностно-временные расчеты" в анализе надежности невосстанавливаемой и восстанавливаемой системы;
- расчет показателей статической вероятности реализации заданного критерия, вероятности безотказной работы и отказа за заданную наработку, средней наработки до отказа, коэффициента готовности, средней наработки на отказ, среднего времени восстановления, вероятности безотказной работы (отказа) восстанавливаемой системы, вероятности готовности смешанной системы, значимостей и вкладов элементов (по методике ОЛВМ).

В примерах данного Теста №2 продемонстрированы следующие функциональные возможности Комплекса:

- определения прямых (КПУФ) и обратных (МСО) логических моделей структурно-сложных систем с множественными циклическими (мостиковыми) связями элементов (примеры 2.2 и 2.3);
- вычисления вероятностных показателей надежности систем во всем диапазоне возможных значений (от 0.0 до 1.0 включительно) параметров элементов (пример 2.1);
- построения немонотонных моделей частичного отказа (или частичной работоспособности) системы, и вычисления соответствующих вероятностные показатели (пример 2.6);
- моделирования и расчета вероятностных характеристик безотказности и отказа смешанных системных объектов, состоящих из восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов (пример 2.7)

Корректность реализации в ПК АСМ СЗМА указанных функций и выполненных расчетов системных показателей, подтверждена сопоставлением (и полным совпадением) полученных машинных результатов с результатами моделирования и расчетами надежности рассматриваемой СЭС, приведенными в литературных источниках (пример 2.1, 2.2) и полученными с помощью программных комплексов Risk Spectrum и Relex (все примеры Теста №2) [30-32, 20].

3.3. Расчетный и аналитический Тест №3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ФРАГМЕНТА ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Справка. Рассматриваемая задача разработана специалистами по вероятностному анализу безопасности СПБАЭП и опубликована в журнале "Тяжелое Машиностроение" № 8 за 2004 г. в статье "Оценка безопасности атомных энергетических объектов на стадии проектирования"[33]. Возможности решения этой задачи с помощью различных программных комплексов (ПК "Risk Spectrum" ПК "Relex" и ПК АСМ СЗМА) детально исследованы в совместной НИР организаций ФГУП "СПБАЭП", ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург и ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова, Москва [20].

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №3 приведено в приложении 1.

На рис.24 представлена функциональная схема фрагмента ядерной энергетической установки (ЯЭУ) [33].

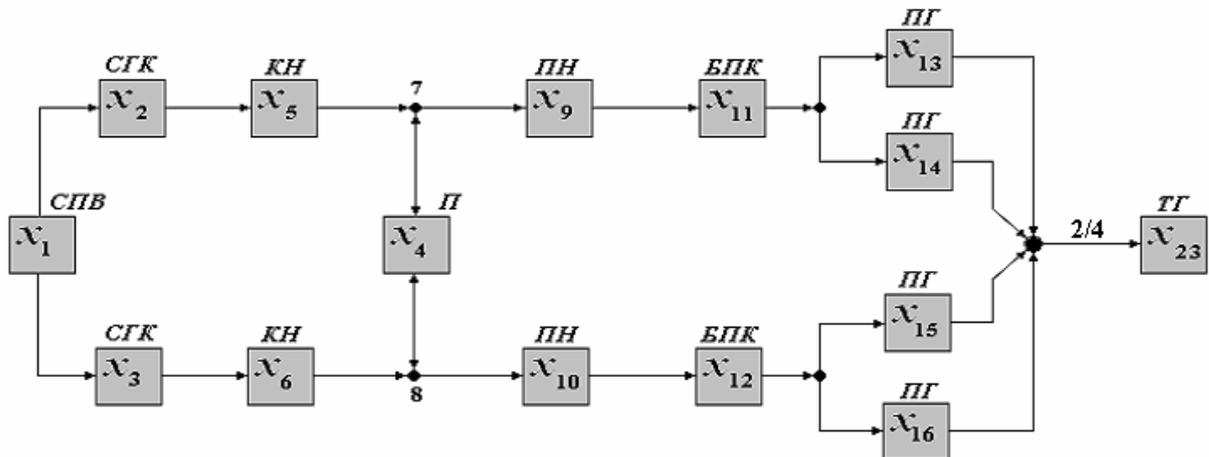


Рис. 24. Функциональная схема ЯЭУ

Рассматриваемая ЯЭУ состоит из следующих основных элементов и подсистем:

- системы поддержания вакуума (СПВ) в секциях главного конденсатора (1);
- 2-х секций главного конденсатора (СГК) левого и правого каналов (2, 3);
- 2-х конденсатных насосов (КН) левого и правого каналов (5, 6);
- перемычки (П) между каналами (4);
- 2-х питательных насосов (ПН) левого и правого каналов (9, 10);
- 2-х блоков питательных клапанов (ПК) левого и правого каналов (11, 12);
- 4-х парогенераторов (ПГ) левого и правого каналов (13, 14, 15, 16);
- одного турбогенератора (ТГ) (23).

Наличие переемычки x_4 позволяет обеспечить работу конденсатного насоса одного канала работой питательного насоса другого канала.

Задача состоит в построении моделей и расчете показателей безотказности и/или отказа ЯЭУ, при условии, что для обеспечения нормального функционирования турбогенератора достаточным является нахождение в работе любых двух (из четырех) парогенераторов.

В данном расчетно-аналитическом Тесте №3 решены с помощью ПК АСМ СЗМА следующие пять примеров:

- Пример 3.1. Расчет надежности ЯЭУ по заданным вероятностям безотказной работы элементов, независимым от времени (2 задачи);
- Пример 3.2. Расчет коэффициента готовности восстанавливаемой ЯЭУ с заданными средними наработками до отказа и временем восстановления элементов в предположении экспоненциального распределения (1 задача);
- Пример 3.3. Определение списка кратчайших путей успешного функционирования ЯЭУ (1 задача);
- Пример 3.4. Определение списка минимальных сечений отказов ЯЭУ (1 задача);
- Пример 3.5. Решение задачи вероятностного анализа ЯЭУ с помощью дерева отказов (3 задачи)

Примерами данного Теста №3 подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ графов связности с циклическими (мостиковыми) и комбинаторными связями элементов;
- представление с помощью СФЦ деревьев отказов;
- построение монотонных прямых (КПУФ) и обратных (МСО) моделей;
- моделирование и расчет показателей свойств надежности;
- режимы "Статические расчеты" и "Вероятностно-временные расчеты" в анализе надежности восстанавливаемой системы;

- расчет показателей статической вероятности реализации заданного критерия;
- расчет коэффициента готовности, средней наработки на отказ, среднего времени восстановления, вероятности безотказной работы (отказа) восстанавливаемой системы;
- при моделировании и выполнении расчетов корректно учитываются размноженные вершины и комбинаторные связи элементов в СФЦ деревьев отказов и графов связности с циклами.

Продемонстрированы следующие функциональные возможности, реализованные в Комплекса:

- использование прямого (примеры 3.1-3.4, СФЦ работоспособности) и обратного (пример 3.5, деревья отказов) подходов к построению СФЦ надежности (безотказности и отказа) структурно-сложной ЯЭУ с циклическими (мостиковыми) и мажоритарными (К/Н) связями подсистем;
- построение прямых (КПУФ) и обратных (МСО) логических ФРС, как на основе СФЦ циклических графов связности с комбинаторными связями, так и на основе СФЦ деревьев отказов (примеры 3.3 и 3.4);
- вычисление статических и вероятностно-временных показателей надежности этого класса ОИАЭ, на основе прямых моделей работоспособности (примеры 3.1, 3.2); и на основе обратных моделей деревьев отказов (пример 3,5).

Рассмотренные в Тесте 3 примеры показывают, что функциональные возможности ПК АСМ СЗМА позволяют строить прямые и обратные модели для анализа ОИАЭ и вычислять показатели надежности как на основе СФЦ графов связности с циклами, так и на основе СФЦ деревьев отказов.

Правильность решения задач моделирования и расчета надежности ЯЭУ подтверждена совпадением построенных ПК АСМ СЗМА логических моделей и вычисленных показателей надежности, с результатами решения этих задач, полученными с помощью программных комплексов Risk Spectrum и Relex [20], а также с данными, приведенными в статье [33].

3.4. Расчетный и аналитический Тест №4. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВАРИАНТОВ СЦЕНАРИЯ РАЗВИТИЯ АВАРИИ, ЗАДАННОГО ДЕРЕВОМ СОБЫТИЙ

Справка. Рассматриваемая задача разработана специалистами НТЦ "Промышленная безопасность" Ростехнадзора РФ [34]. Возможности решения этой задачи с помощью различных программных комплексов (ПК "Risk Spectrum" ПК "Relex" и ПК АСМ СЗМА) детально исследованы в совместной НИР организаций ФГУП "СПбАЭП", ОАО "СПИК СЗМА" (Санкт-Петербург) и ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова (Москва) [20].

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №4 приведено в приложении 1. В тесте рассмотрен пример сценария развития аварии, разработанный в Методических указаниях по проведению анализа риска ОПО [34]. Соответствующее исходное дерево событий изображено на рис.25.

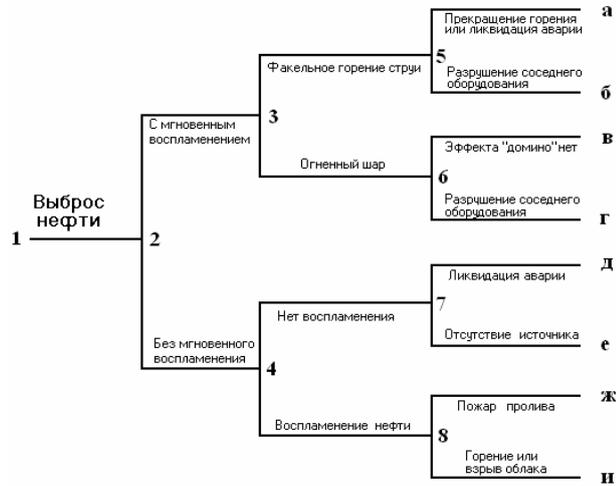
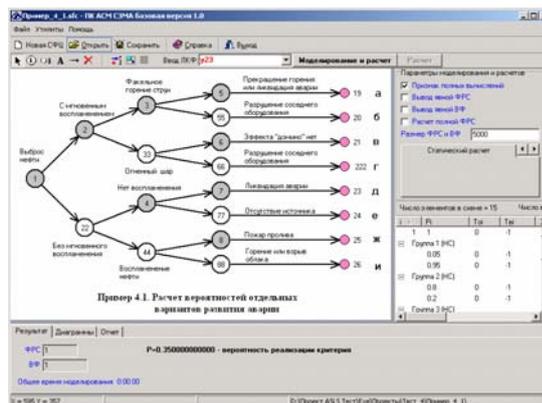


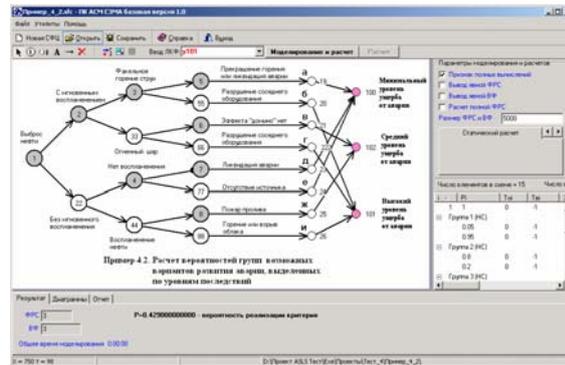
Рис. 25. Дерево событий аварии

В данном расчетно-аналитическом Тесте №4 решены четыре примера различных видов задач моделирования и расчета вероятностных показателей сценариев развития аварии ОПО, заданных деревом событий (см. рис.25):

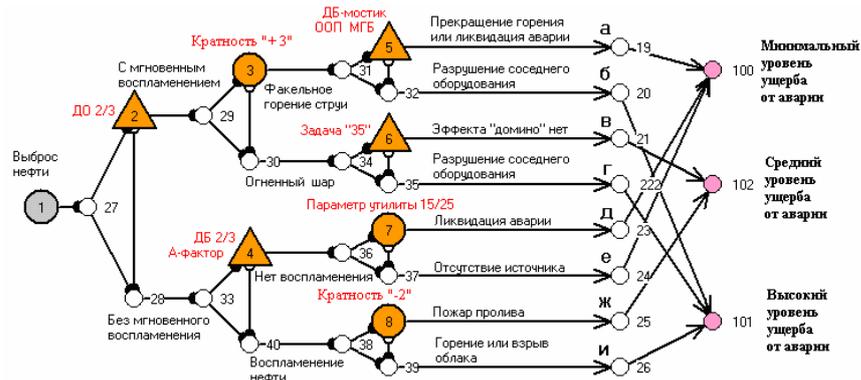
- Пример 4.1. Расчет вероятностей отдельных вариантов развития аварии на основе СФЦ деревьев событий с группами несовместных событий (1 задача);



- Пример 4.2. Расчет вероятностей групп возможных вариантов развития аварии, выделенных по уровням последствий (1 задача);



- Пример 4.3. Представление дерева событий с помощью СФЦ с инверсиями (1 задача);
- Пример 4.4. Декомпозированное дерево событий аварии с подключенными структурами различных подсистем (3 задачи).



С помощью примеров данного теста подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ деревьев событий сценариев развития аварий;
- моделирование свойств безопасности (вероятностного риска возникновения аварии определенного уровня последствий);
- построение монотонных и немонотонных прямых логических моделей;
- построение точных многочленов расчетных вероятностных функций;
- режимы "Статические расчеты" и "Вероятностно-временные расчеты" в анализе безопасности системы (сценария развития аварии);

- расчет показателей статической вероятности реализации заданного критерия функционирования системы, и вероятности безотказной работы невосстанавливаемой системы, в течение заданной наработки;
- учет кратности элементов;
- структурный учет отказов групп элементов по общей причине.

В примерах Теста №4 продемонстрированы следующие функциональные возможности Комплекса:

- представление СФЦ деревьев событий двумя способами - с использованием ГНС (примеры 4.1, 4.2) и с использованием инверсных связей (примеры 4.3, 4.4);
- обеспечение возможности проведения качественно-сложного анализа сценариев развития аварий и расчета показателя полного риска "ожидаемый ущерб" [34, стр.7] – математического ожидания ущерба (примеры 4.2, 4.4);
- подключение в сценарии развития аварии, задаваемого СФЦ дерева событий, различных видов структур подсистем (пример 4.4).

Корректность вычислений вероятностей реализации каждого отдельного из всех возможных вариантов сценария развития аварии (пример 4.1), подтверждена совпадением результатов, полученных ПК АСМ СЗМА с данными, приведенными в литературных источниках [34], и с расчетами, выполненными комплексами Relex и Risk Spectrum [20].

Корректность вычислений ПК АСМ СЗМА вероятностей реализации вариантов развития аварии, различающихся уровнями ожидаемых последствий (ущерба) (примеры 4.2, 4.3), подтверждена их совпадением с данными, полученными ПК Relex, и ручными аналитическими расчетами.

Имеют место расхождения результатов решения примеров 4.2 и 4.3 с помощью ПК АСМ СЗМА и с помощью ПК Risk Spectrum (см. приложение 1, Тест №4, Пример 4.2). Причины указанного несовпадения пока не ясны и нуждаются в дополнительном анализе.

3.5. Расчетный и аналитический Тест №5.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

Справка. Рассматриваемая задача разработана специалистами НТЦ "Промышленная безопасность" Ростехнадзора РФ [34]. Возможности решения этой задачи с помощью различных программных комплексов (ПК "Risk Spectrum", ПК "Relex" и ПК АСМ СЗМА) исследованы в совместной НИР трех организаций: ФГУП "СПбАЭП", ОАО "СПИК СЗМА" (Санкт-Петербург) и ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова (Москва) [20].

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №5 приведено в приложении 1.

На рис.26 изображено исходное дерево отказов заправочной операции [34, стр.35, рис.2].

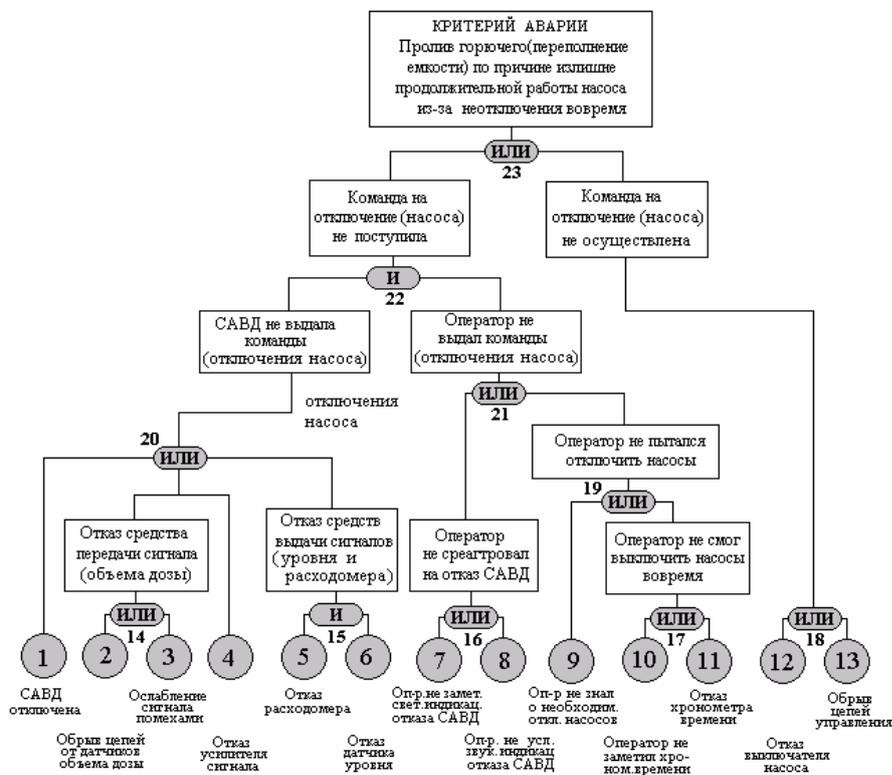


Рис. 26. Исходное дерево отказа заправочной станции

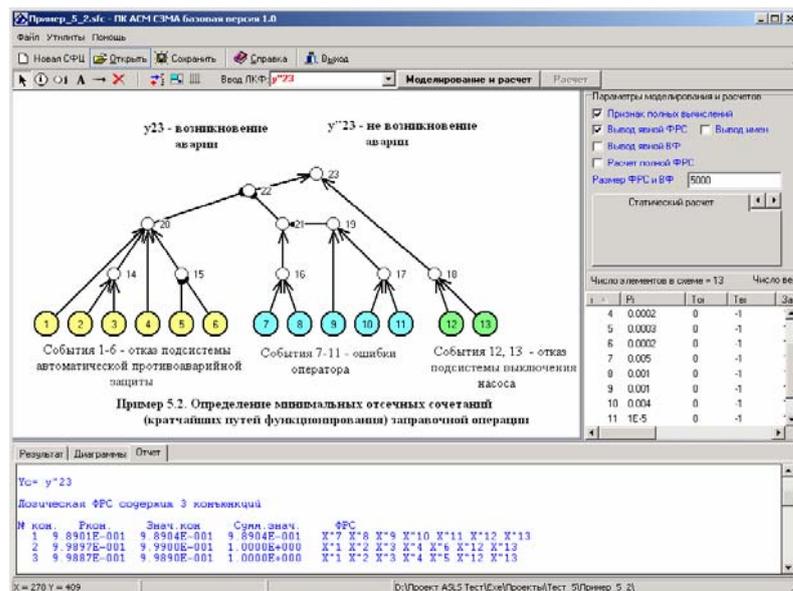
В данном Тесте №5 требуется:

- определить минимальные пропускные сочетания (минимальные сечения отказов), обязательное (одновременное) возникновение которых достаточно для появления головного события (аварии) [34];

- определить минимальные отсечные сочетания (кратчайшие пути успешного функционирования) – набор исходных событий, который гарантирует отсутствие головного события (аварии) при условии невозникновения ни одного из составляющих этот набор событий [34];
- рассчитать вероятность возникновения аварии (вероятность реализации вершинного события дерева отказов).

С помощью ПК АСМ СЗМА решены следующие четыре примера:

- Пример 5.1. Определение минимальных пропускных сочетаний (минимальных сечений отказов) заправочной операции (1 задача);
- Пример 5.2. Определение минимальных отсечных сочетаний (кратчайших путей успешного функционирования) заправочной операции (1 задача);



- Пример 5.3. Моделирование и расчет вероятности аварии системы на основе дерева отказов (1 задача);
- Пример 5.4. Моделирование и расчет вероятности не возникновения аварии системы на основе дерева отказов (1 задача).

Примерами данного Теста №5 подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ деревьев отказов условий возникновения аварий систем;

- построение монотонных прямых и обратных логических функций, представляющих минимальные сечения отказов и кратчайшие пути успешного (безаварийного) функционирования системы соответственно;
- построение правильного многочлена расчетной вероятностной функции аварии и безопасности системы;
- выполнение моделирования и расчетов вероятностных показателей безопасности системы;
- расчет статической вероятности реализации критерия (прямого и инверсного);
- точный расчет вероятности вершинного события ДО, при условии независимости отказов элементов.

Продемонстрированы следующие функциональные возможности, реализованные в Комплексе:

- корректное представление с помощью СФЦ деревьев отказов моделей безопасности исследуемых систем (все примеры);
- автоматическое построение как прямых (МСО), так и обратные (КПУФ) логических моделей аварии и безопасности исследуемых систем (примеры 5.1. и 5.2);
- моделирование и вычисление точных вероятностей реализации (возникновения аварии) и не реализации (не возникновения аварии) вершинных событий деревьев отказов (примеры 5.3, 5.4).

Корректность решения примеров Теста №5 ПК АСМ СЗМА подтверждена сопоставлением результатов с данными, приведенными в литературных источниках [34] и полученными с помощью комплексов Risk Spectrum и Relex [20].

3.6. Расчетный и аналитический Тест №6. ТИПОВЫЕ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ

Справка. Рассматриваемые примеры учета типовых моделей отказов по общей причине на простой мостиковой структуре пятиэлементной системы были исследованы в совместной НИР трех организаций: ФГУП "СПбАЭП", ОАО "СПИК СЗМА" (Санкт-Петербург) и ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова (Москва) [20].

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №6 приведено в приложении 1. Функциональная структура исследуемой мостиковой системы представлена на Рис.27 [20]:

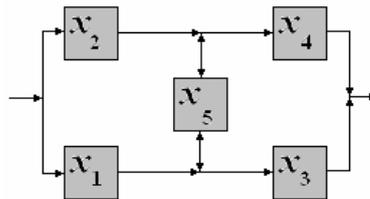


Рис. 27. Функциональная схема мостиковой системы

В данном Тесте №6 требуется:

- вычислить вероятность отказа и/или безотказной работы мостиковой системы с учетом отказов по общей причине групп из двух, трех и четырех элементов;
- решить указанные задачи для трех типовых моделей ООП - альфа-фактора, бета-фактора и множественных греческих букв;
- решить указанные задачи на основе двух форм представления структурных моделей надежности мостиковой системы, с помощью СФЦ блок-схемы безотказной работы (графа связности с циклами) и с помощью СФЦ дерева отказов:

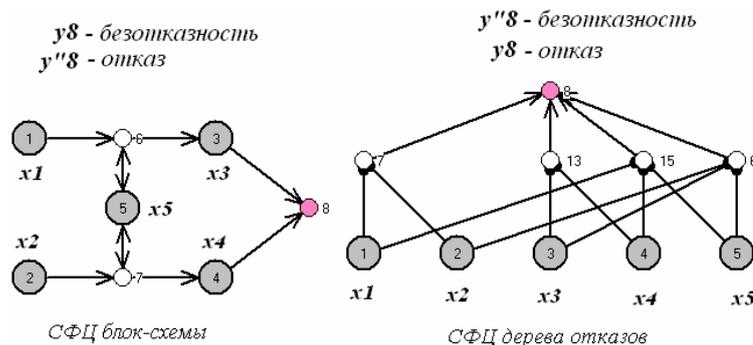
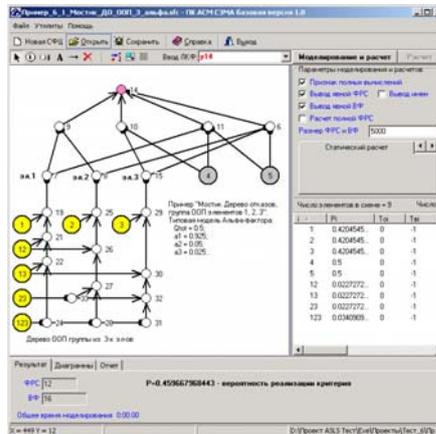


Рис. 28. СФЦ мостиковой системы

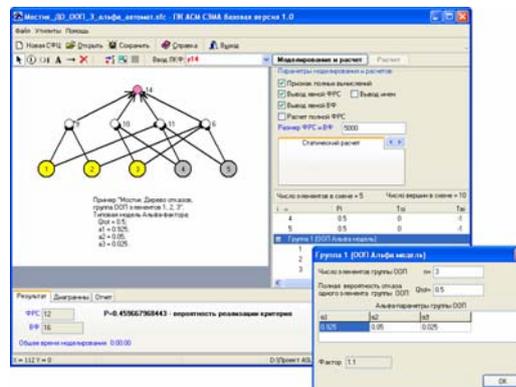
- решить указанные задачи двумя способами – структурным (основывается на ручном построении СФЦ дерева отказов заданной группы элементов ООП) и автоматическом (основывается на задании только групп и параметров ООП).

В данном Тесте №6 с помощью ПК АСМ СЗМА решены три примера:

- Пример 6.1. Расчет надежности системы с использованием структурного способа учета модели альфа-фактора ООП трех элементов 1, 2 и 3 (2 задачи);



- Пример 6.2. Расчет надежности мостиковой системы с использованием структурного способа учета разных моделей, различных групп и различных параметров элементов ООП (21 задача);
- Пример 6.3. Расчет надежности мостиковой системы с использованием автоматического способа учета разных моделей, различных групп и разных параметров элементов ООП (25 задач).



Примерами данного Теста №6 подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ графов связности с циклами, определяющих условия безотказности систем с учетом трех типовых моделей ООП;
- представление с помощью СФЦ деревьев отказов, определяющих условия возникновения отказа систем с учетом трех типовых моделей ООП;

- структурный и автоматический учет отказов групп элементов по общей причине, представляемых с помощью СФЦ деревьев отказов и СФЦ блок-схем безотказности с циклами (графах связности);
- учет трех типовых моделей ООП - альфа-фактора, бета-фактора и множественных греческих букв;
- построение монотонных и немонотонных, прямых и обратных логических функций, с представлением элементов, определяющих ООП в МСО и КПУФ;
- построение правильных многочленов расчетных ВФ с учетом ООП;
- режим "Статические расчеты" и вычисление точной вероятности реализации критерия (прямого и инверсного) с учетом ООП;
- режим "Приближенные расчеты" и вычисление приближенных значений вероятностей реализации критерия (прямого или инверсного) с учетом ООП;
- точный расчет вероятности вершинного события ДО с учетом ООП, при условии независимости отказов элементов.

Продемонстрированы следующие функциональные возможности, реализованные в Комплексе:

- представления с помощью СФЦ графов связности с циклами и деревьев отказов моделей исследуемых систем с учетом ООП (все примеры Теста №6);
- реализация двух способов учета ООП:
 - структурного представления в СФЦ с ДО ООП (примеры 6.1 и 6.2);
 - автоматического, в котором для каждой группы указываются только состав элементов, тип ООП и соответствующие параметры (задачи примера 6.3);
- учет трех типовых моделей ООП - альфа-фактора, бета-фактора и множественных греческих букв (все примеры Теста №6).

Корректность учета ООП в ПК АСМ СЗМА подтверждена совпадением результатов решения ПК АСМ СЗМА задач Теста №6 с результатами их решения, полученными с помощью аттестованного ПК Risk Spectrum и широко используемого ПК Relex [20].

3.7. Расчетный и аналитический Тест №7. НЕТИПОВЫЕ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ

Справка. Примеры данного Теста №7 описаны в книге "Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ" [61, с.118-119].

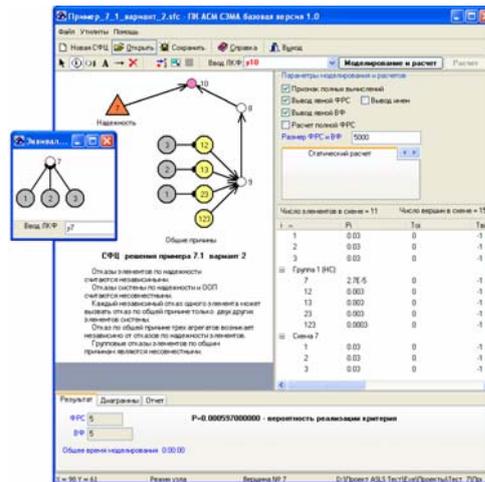
Полное описание решений примеров и задач данного Теста №7 приведено в приложении 1. В расчетно-аналитическом Тесте №7 с помощью ПК АСМ СЗМА решены два примера:

- Пример 7.1. Оценка вероятности незапуска системы из трех генераторов с учетом ООП (2 задачи);
- Пример 7.2. Учет ООП в системе с коллекторной структурой (2 задачи).

В Примере 7.1 Рассматривается система, состоящая из трех дизель-генераторов (см. [61], стр.118). Для выполнения системой функции безопасности достаточно работы одного агрегата. Полагается, что вероятность незапуска одного отдельного дизельгенератора составляет $p_i = 0.03, i = 1,2,3$. При этом, на один независимый отказ приходится $\delta_2 = 0.1$ и $\delta_3 = 0.01$ отказов по общей причине соответственно двух и трех агрегатов. Требуется рассчитать вероятность отказа системы при пуске с учетом независимых отказов элементов и возможных отказов по общей причине.

Решение Примера 7.1 выполнено с помощью ПК АСМ СЗМА в двух вариантах постановки задачи. Первый вариант соответствует общей постановке данной задачи, приведенной в [61]. Вычисленная с помощью ПК АСМ СЗМА вероятность $P_{отказа} = 0.000322947$ незапуска системы из трех дизель-генераторов с учетом ООП на порядок больше оценки только ее надежности (0.000027), что согласуется с физическим смыслом исследуемого процесса. Однако полученный результат не совпал с расчетом этого показателя ($0.6 \cdot 10^{-3}$), приведенным в первоисточнике [61, с.118].

Второй вариант решения на ПК АСМ СЗМА Примера 7.1 является частным случаем предыдущего общего решения, и полностью соответствует постановке этой задачи в [61, с.118].



Полученный с помощью ПК АСМ СЗМА результат второго варианта моделирования и расчета вероятности незапуска системы из трех дизель-генераторов, с учетом ООП, составил $P_{отказа} = 0.000597$, что совпадает с результатом, приведенным в первоисточнике [61, с.118].

На Рис.29 приведена функциональная структура коллекторной системы [61], рассмотренной в Примере 7.2.

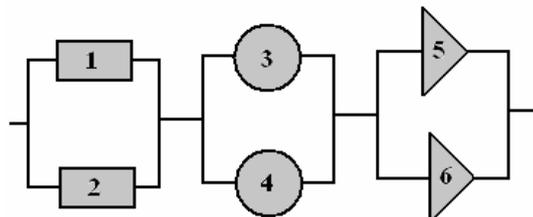


Рис. 29. Коллекторная схема системы

В данной системе имеются три группы элементов ООП - $\{1, 2\}$, $\{3, 4\}$ и $\{5, 6\}$. Из-за наличия связей между парами однотипных дублирующих элементов в группах при независимом отказе одного из них может произойти отказ по общей причине дублирующего элемента.

Первый общий вариант решения примера 7.2 с помощью ПК АСМ СЗМА позволил определить вероятность $P_H = 0.000299970001$ отказа коллекторной системы по надежности (без учета ООП), и вероятность $P_{H+ОП} = 0.006227029799$ ее отказа с учетом ООП. Соотношение этих результатов согласуется с физическим смыслом исследуемого процесса. Однако вероятность $P_{H+ОП} = 0.006227029799$ не

совпадает со значением $3,3 \cdot 10^{-3}$ вероятности этого события, вычисленного в [61, с.119].

Второй вариант решения примера 7.2 представляет собой частный случай постановки рассматриваемой задачи, полностью соответствующий описанию аналитического решения, приведенному в [61]. Выполненное с помощью ПК АСМ СЗМА моделирование и расчет второго варианта Примера 7.2 дал результат $P_{H+оп} = 0.0033$, что точно совпадает с аналитическим решением, приведенным в первоисточнике [61, с.119].

Примерами данного Теста №7 подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

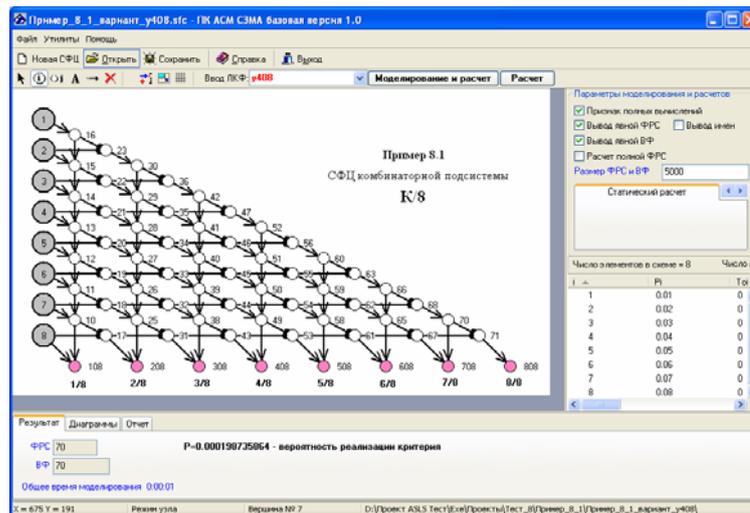
- представление с помощью СФЦ деревьев отказов, позволяющих учесть нетиповые структурные модели отказов по общей причине групп элементов исследуемых систем;
- построение монотонных прямых логических функций, представляющих логически строгие нетиповые модели ООП;
- построение правильных многочленов расчетных вероятностных функций, обеспечивающих корректный расчет надежности (отказа и безотказности) системы с учетом нетиповых ООП;
- режим статических расчетов вероятностей отказов систем с учетом нетиповых моделей ООП;
- использование аппарата групп несовместных событий для корректного учета в структурных, логических и вероятностных моделях нетиповых ООП исследуемых систем;
- использование односвязной двухуровневой структурной декомпозиции с ГНС.

Правильность решений рассмотренных в тесте двух примеров (пример 7.1, вариант 2 и пример 7.2, вариант 2) подтверждена совпадением результатов, полученных ПК АСМ СЗМА, с аналитическими решениями этих задач в первоисточнике [61].

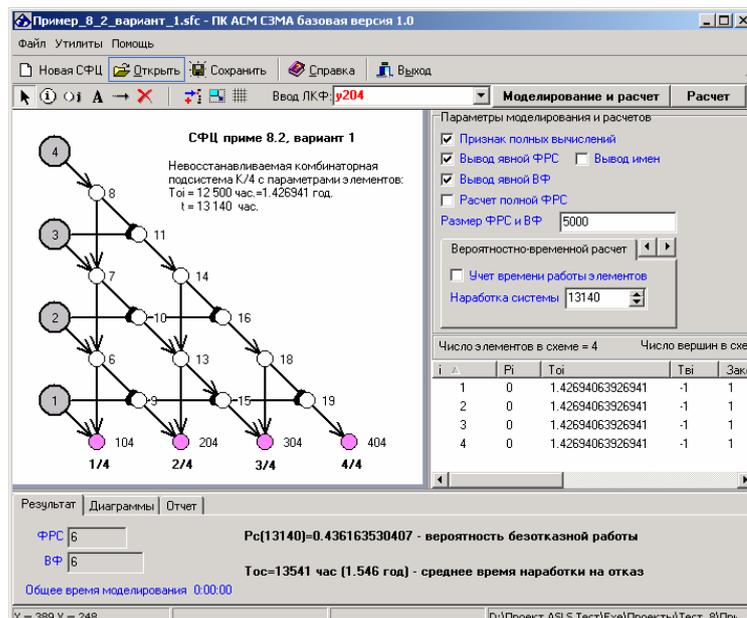
3.8. Расчетный и аналитический Тест №8. МОДЕЛИ КОМБИНАТОРНЫХ ПОДСИСТЕМ

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №8 приведено в приложении 1. В данном расчетно-аналитическом Тесте №8 с помощью ПК АСМ СЗМА решены три примера:

- Пример 8.1. Расчет статических вероятностных показателей надежности комбинаторной подсистемы К/8 (16 задач);



- Пример 8.2. Расчет надежности невосстанавливаемой комбинаторной подсистемы К/4 с заданной средней наработкой до отказа элементов в предположении экспоненциального распределения вероятности безотказной работы элементов (2 задачи);



- Пример 8.3. Расчеты вероятностных характеристик высокоразмерных комбинаторных подсистем (10 задач).

№ вар.	Система К / N	Вероятности элементов	Результаты моделирования и расчетов				
			ПК АСМ СЗМА			P _{К/Н} Relex RBD (ИПУ РАН)	P _{К/Н} Risk Spectrum (СП6АЭП)
			Число комбинаций	P _{К/Н} Утилита агрегирования	P _{К/Н} Утилита формирования комбинаций		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	9/15	p _i = 0.7	5005	0.868857	0.8688574	0.868857	В ПК Risk Spectrum должны вычисляться, но результаты в НИР [20] не приведены
2	15/22		170544	0.671251	0.671251	0.671251	
3	21/38		28781143380	0.982005	не решается	0.982005	
4	7/15	p _i = 0.3	6435	0.131143	0.1311423	0.131143	0.7552
5		p _i = 0.1		3.106305E-4	0.0003106305	3.10631e-4	6.433E-4
6		p _i = 0.01		5.998315E-11	5.998315E-11	5.99831e-11	6.435E-11
7		p _i = 0.001		6.390095E-18	6.390095E-18	6.39009e-18	6.435E-18
8		p _i = 0.0001		6.430497E-25	6.430497E-25	6.43050e-25	6.435E-25
9		p _i = 0.00001		6.43455E-32	6.43455E-32	6.43455e-32	6.435E-32

Примерами данного Теста №8 подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ блок-схем, корректно учитывающих комбинаторные связи К/Н элементов и подсистем исследуемых объектов;
- построение монотонных прямых и обратных (инверсных) логических функций, представляющих условия реализации и/или не реализации различных, прямых и обратных комбинаторных связей в системе;
- построение правильных многочленов расчетных вероятностных функций, обеспечивающих корректный расчет надежности (отказа и безотказности) системы с учетом комбинаторных связей;
- использование утилит агрегирования и формирования комбинаций для расчета надежности односвязных комбинаторных подсистем большой размерности;
- режим "Статический расчет" вычисления вероятностей отказов систем с учетом комбинаторных связей;
- режим "Вероятностно-временной расчет" вычисления соответствующих показателей надежности систем с учетом комбинаторных связей;

- расчет значимостей и вкладов элементов по методике ОЛВМ с учетом комбинаторных связей элементов и подсистем.

В примерах данного Теста №8 продемонстрированы следующие функциональные возможности Комплекса:

- реализацию трех способов комбинаторного анализа - структурного (с помощью СФЦ) и двух автономных (с помощью программных утилит агрегирования и перебора комбинаций) которые позволяют строить как прямые, так и обратные (инверсные) модели и вычислять статические и вероятностно-временные показатели надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых комбинаторных подсистем (все примеры Теста №8);
- возможность непосредственного структурного учета графическими средствами СФЦ всех видов комбинаторных связей и отношений в системе, до $N=8$ включительно (Пример 8.1 и Пример 8.2);
- возможность ПК АСМ СЗМА с помощью двух программных утилит (агрегирования и перебора комбинаций) рассчитывать вероятностные характеристики высокоразмерных однородных (до $N=30$) и неоднородных (до $N=20$) односвязных комбинаторных подсистем (Пример 8.3);
- при структурном представлении в СФЦ комбинаторных подсистем и при использовании утилиты формирования комбинаций ПК АСМ СЗМА, обеспечивается возможность получения соответствующих прямых и инверсных логических моделей K/N (явного представления всех комбинаций) (Примеры 8.1 и 8.2);

Корректность решения комбинаторных задач в ПК АСМ СЗМА подтверждена сопоставлением и совпадением результатов, полученных ПК АСМ СЗМА, с решениями, тех же задач с помощью аттестованного программных комплексов Risk Spectrum и широко используемого комплекса Relex [20].

3.9. Расчетный и аналитический Тест №9. ДВУХУРОВНЕВАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ И АППАРАТ КРАТНОСТИ В АНАЛИЗЕ ВЫСОКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

Справка. В Тесте №9 рассматривается пример из реального проекта АСУТП [43], решение которого было исследовано и прошло апробацию в ходе разработки и защиты кандидатской диссертации [42].

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №9 приведено в приложении 1.

На Рис.30 изображена полная (недекомпозированная) СФЦ исследуемой автоматизированной системы управления (АСУ), реализующей функцию F-15 противоаварийной защиты [43, 42].

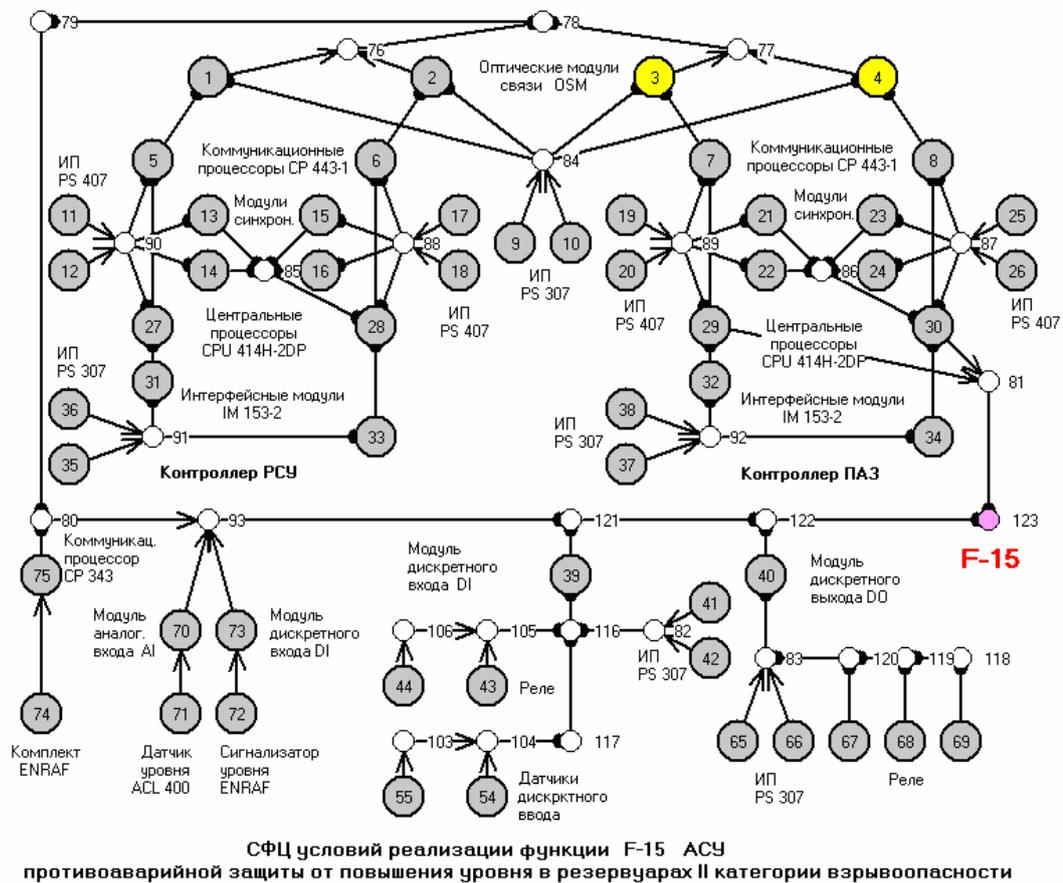


Рис. 30. Полная (недекомпозированная) СФЦ АСУ

В данном расчетно-аналитическом Тесте №9 с помощью ПК АСМ СЗМА решены пять примеров:

- Пример 9.1. Моделирование и расчет надежности на основе недекомпозированной СФЦ (1 задача);

- Пример 9.2. Моделирование и расчет надежности АСУ, на основе частично декомпозированной СФЦ (1 задача);
- Пример 9.3. Моделирование и расчет надежности АСУ, на основе полностью декомпозированной СФЦ (1 задача);
- Пример 9.4. Моделирование и расчет надежности АСУ с использованием аппарата кратности вершин (1 задача);
- Пример 9.5. Моделирование и расчет надежности АСУ с совместным использованием декомпозиции и аппарата кратности вершин (1 задача).

Примерами данного Теста №9 подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ блок-схем структурных моделей надежности высокоразмерных систем;
- построение монотонных прямых логических функций безотказности высокоразмерных систем;
- построение правильных многочленов расчетных вероятностных функций, обеспечивающих корректный расчет показателей надежности высокоразмерных систем;
- режим вероятностно-временных расчетов показателей надежности невосстанавливаемых систем;
- односвязная двухуровневая структурная декомпозиция высокоразмерной системы;
- учет кратностей элементов.

В примерах данного Теста №9 продемонстрированы следующие функциональности Комплекса:

- представление с помощью СФЦ блок-схем безотказности структурно-сложных систем большой размерности (все примеры Теста №9);
- большие временные затраты на моделирование и расчет показателей надежности высокоразмерных недекомпозированных систем (Пример 9.1);

- сокращение времени моделирования и расчетов высокоразмерной системы при частичной декомпозиции только односвязных конъюнктивных подсистем, с сохранением точности расчетов вероятностно-временных показателей надежности (Пример 9.2);
- существенное сокращение времени моделирования и расчетов высокоразмерной системы при полной декомпозиции односвязных конъюнктивных и дизъюнктивных подсистем, с сохранением точности расчетов вероятностных показателей (вероятности безотказной работы) и вычислении приближенных (в сторону уменьшения) временных (средней наработки до отказа) характеристик (Пример 9.3);
- возможность применения, для сокращения размерности и повышения скорости моделирования, аппарата кратности вершин СФЦ (Пример 9.4);
- возможность совместного применения для сокращения размерности и повышения скорости моделирования односвязной структурной декомпозиции и аппарата кратности вершин СФЦ (Пример 9.5);

Ни на одном из доступных программных комплексов не удалось решить задачи данного Теста №9. Поэтому корректность моделирования и вычислений вероятностно-временных показателей надежности АСУ, как невозстанавливаемой системы, можно подтвердить косвенно, ссылкой на Тесты №1, 2 и 8, в которых правильность решения задач этого класса неоднократно была обоснована аналитическими решениями, результатами из литературных источников и данными, полученными с помощью ПК Relex и аттестованного ПК Risk Spectrum. Дополнительно, с помощью ПК АСМ СЗМА был выполнен контроль на непротиворечивость (согласованность) результатов моделирования и вычисления вероятности безотказной работы АСУ и вероятности ее отказа.

3.10. Расчетный и аналитический Тест №10. ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ МОДЕЛЕЙ

Настоящий Тест №10 разработан в ходе аттестации ПК АСМ СЗМА при ответе на вопрос эксперта Бахметьева А.М. и его коллег:

Каковы ограничения на размерность анализируемых систем?

Полное описание решений примеров и задач данного Теста №10 приведено в приложении 1.

Целью данного теста является иллюстрация на примерах типовых для ОЛВМ и технологии АСМ условий возникновения проблемы размерности, ограничивающей возможности практического анализа систем, а также наиболее эффективных способов преодоления проблем размерности в ПК АСМ СЗМА.

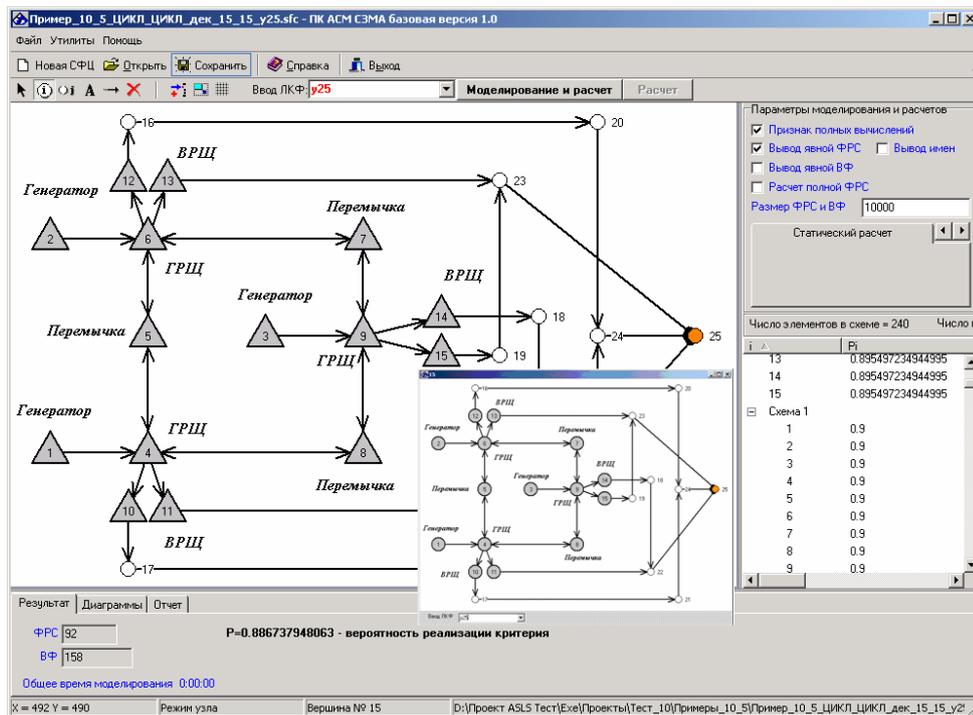
Большинство примеров данного Теста 10 являются абстрактными и базируются на вырожденных структурах систем, представляемых СФЦ. Они не представляют реальных системных объектов, а в утрированной форме отображают тот вид логических связей в СФЦ, при моделировании которых наиболее ярко проявляются различные аспекты ограничений размерности ПК АСМ СЗМА. Примеры предназначены как для иллюстрации видов ограничений размерности моделей, которые могут проявляться в процессе анализа надежности и безопасности систем, так и для демонстрации возможностей ПК АСМ СЗМА преодолевать проблемы большой размерности при его практическом использовании.

Не смотря на то, что примеры Теста №10 являются абстрактными, они были разработаны так, что корректность результатов моделирования и расчетов на ПК АСМ СЗМА может быть проверена решением большинства задач с помощью аттестованного ПС Risk Spectrum.

В данном расчетно-аналитическом Тесте №10 с помощью ПК АСМ СЗМА решены пять примеров:

- Примеры 10.1. Ограничения размерности структурной постановки задач (14 задач);

- Примеры 10.2. Ограничения размерности логического моделирования (18 задач);
- Примеры 10.3. Ограничения размерности вероятностного моделирования (17 задач);
- Примеры 10.4. Ограничения размерности вычислений (4 задачи);
- Примеры 10.5. Высокоразмерная декомпозированная СФЦ с циклами (6 задач).



Примерами данного Теста №10 подтверждена реализация в ПК АСМ СЗМА следующих функций (см. табл.2):

- представление с помощью СФЦ блок-схем, графов связности с циклами и деревьев отказов структурных моделей надежности высокоразмерных систем;
- построение монотонных прямых и обратных логических функций отказа и безотказности высокоразмерных систем;
- построение правильных многочленов расчетных вероятностных функций, обеспечивающих корректный расчет показателей надежности высокоразмерных систем;
- режимы "Статические расчеты" и "Вероятностно-временные расчеты" показателей надежности невозстанавливаемых систем;

- односвязная двухуровневая структурная декомпозиция высокоразмерной системы;

В примерах Теста №10 продемонстрированы следующие возможности Комплекса:

- представление с помощью СФЦ блок-схем без циклов, графов связности с циклами и деревьев отказов структурно-сложных систем большой размерности (все примеры Теста №10);
- способы преодоления различных форм проявления проблемы размерности в ПК АСМ СЗМА (соответствующие примеры Теста 10);
- использование методов односвязной структурно декомпозиции для анализа высокоразмерных систем с множественными циклическими связями (Пример 10.5);

Большинство задач Теста 10 решены ПК АСМ СЗМА точно (режимы "Статический расчет" и "Вероятностно-временной расчет") и приближенно, для гипотезы о независимости в совокупности отказов элементов (режим "Приближенный расчет"). Значения приближенных расчетов вероятностных показателей получены по методике, реализованной ПК Risk Spectrum и могут быть проверены с помощью этого комплекса для примеров и задач Теста 10, в которых использовались СФЦ деревьев отказов.

Практически все задачи Теста 10 решены в прямой и обратной постановке (безотказность, отказ). Полученные результаты подтверждают их непротиворечивость и согласованность.

3.11. Контрольные примеры. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ И ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ

Справка. Контрольные примеры были решены в ходе аттестации ПК АСМ СЗМА по рекомендации Председателя Секции №5 Совета по аттестации ПС. В выданном Задании (см. приложение 5) были приведены исходные данные и результаты решения с помощью аттестованного ПС "CRISS 4.0" пять контрольных примеров из второй части верификационного отчета [69].

Полное описание решений Контрольных примеров приведено в приложении 2.

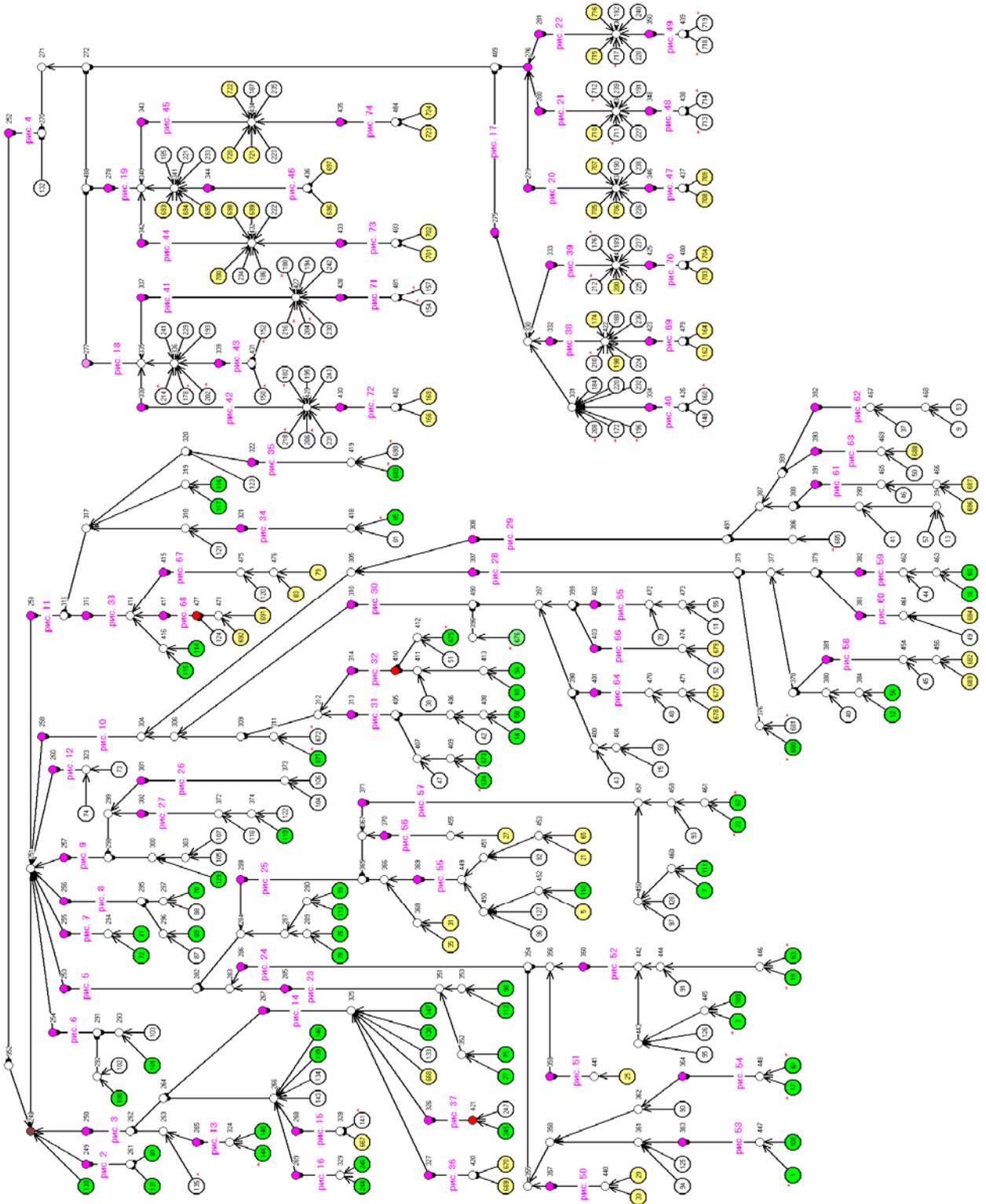
Целью выдачи и решения Контрольных примеров является оценка сопоставимости (точности) результатов, получаемых с помощью ПК АСМ СЗМА с решениями примеров, имеющихся в базе НТЦ ЯРБ и решенных с помощью аттестованных ПС.

Все приведенные в Задании Контрольные примеры разработаны специалистами ОКБМ в НИР [69], а контрольные результаты их решений получены с помощью аттестованного ПС "CRISS 4.0". Согласно Заданию Контрольные примеры, решенные с помощью ПК АСМ СЗМА (см. приложение 2) имеют следующие наименования:

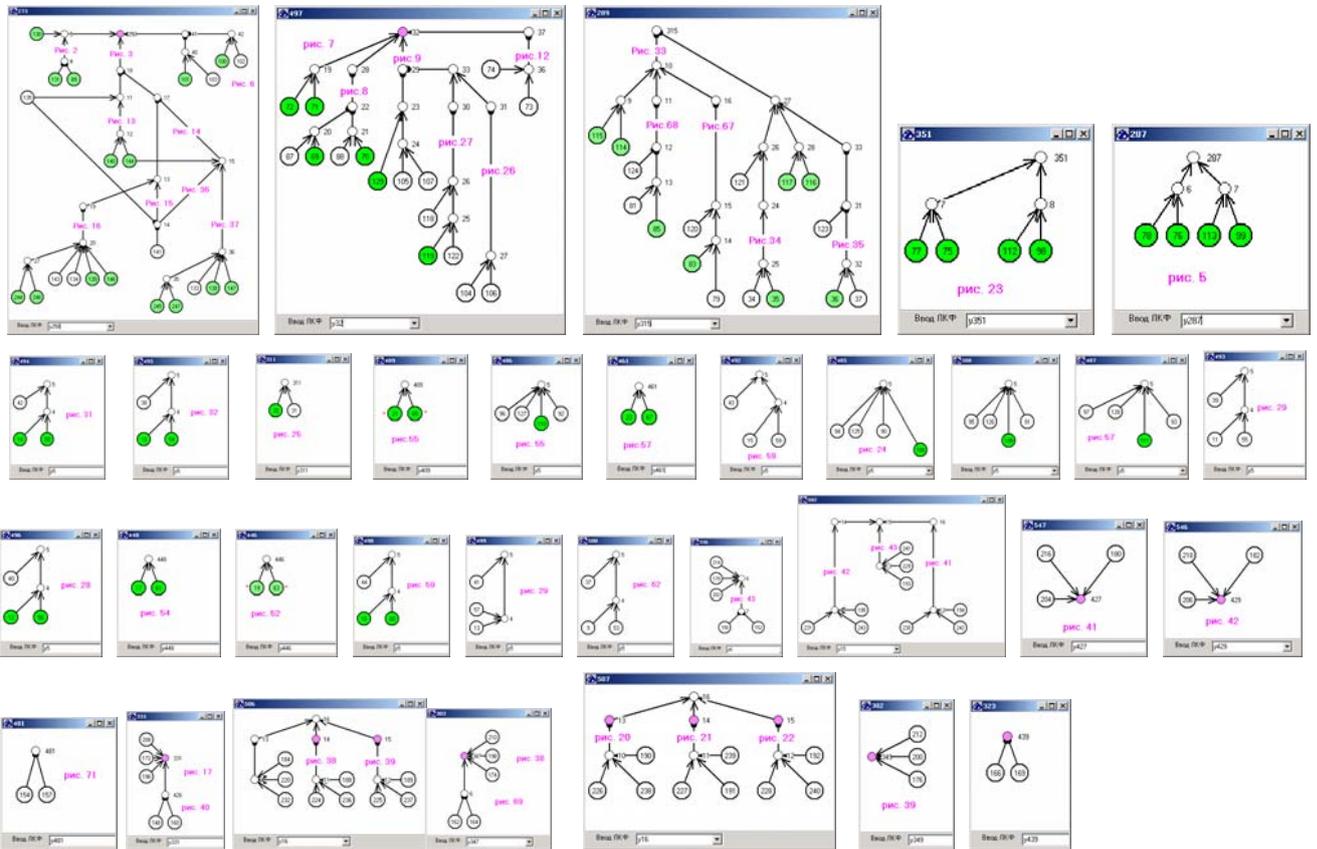
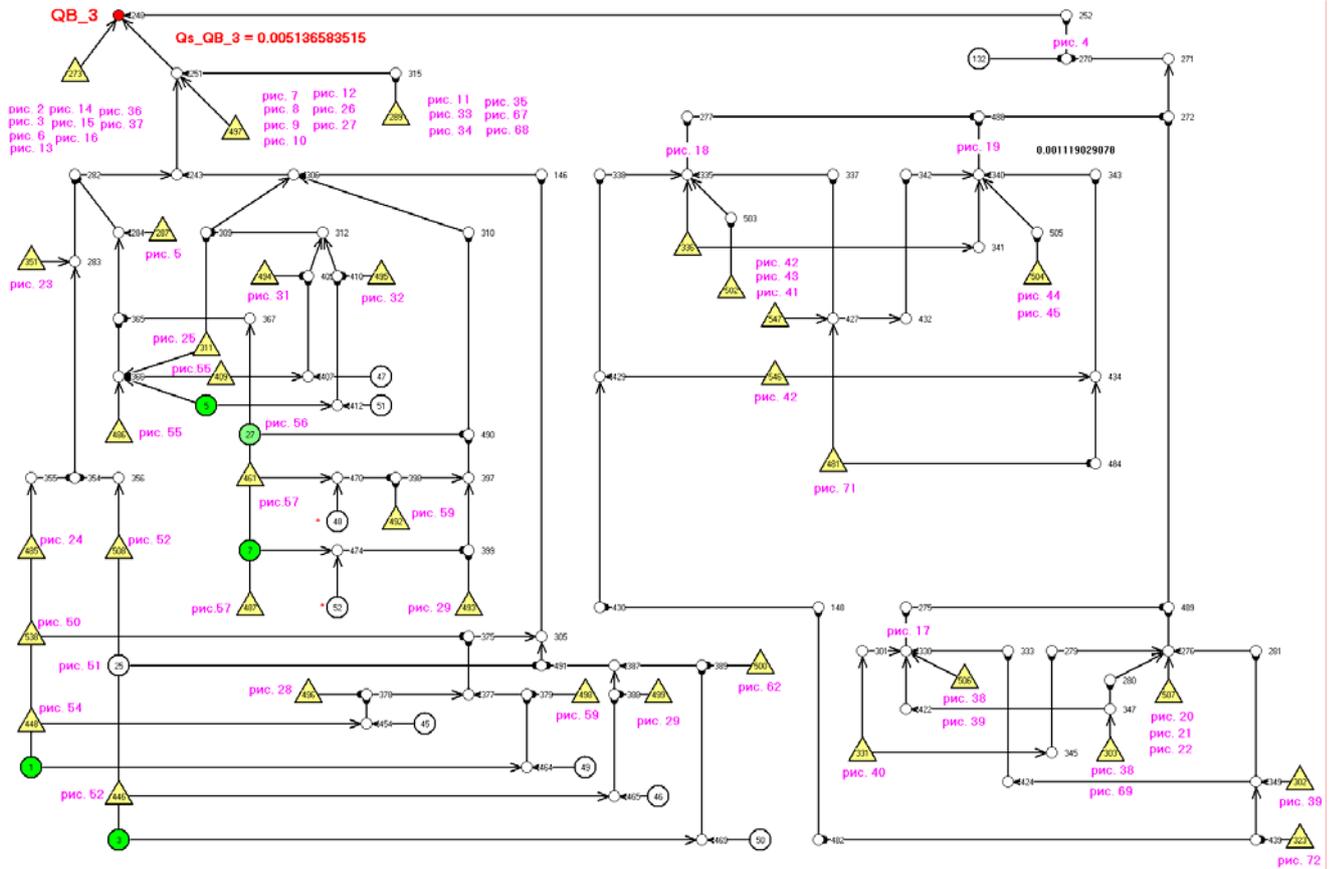
- ПРИМЕР 1. Моделирование и расчет вероятностных показателей системы **QB_3** (2 задачи, 5 вариантов);
- ПРИМЕР 2. Моделирование и расчет вероятностных показателей системы **СВ3** (2 задачи, 6 вариантов);
- ПРИМЕР 3. Моделирование и расчет вероятностных показателей системы **М3** (2 задачи, 5 вариантов);
- ПРИМЕР 4. Моделирование и расчет вероятностных показателей системы **КТА** (2 задачи);
- ПРИМЕР 5. Моделирование и расчет вероятностных показателей системы **JTP** (2 задачи).

На следующих рисунках приведены СФЦ указанных пяти Контрольных примеров (см. приложение 2), разработанные на основе деревьев отказов выданного Задания (см. приложение 5).

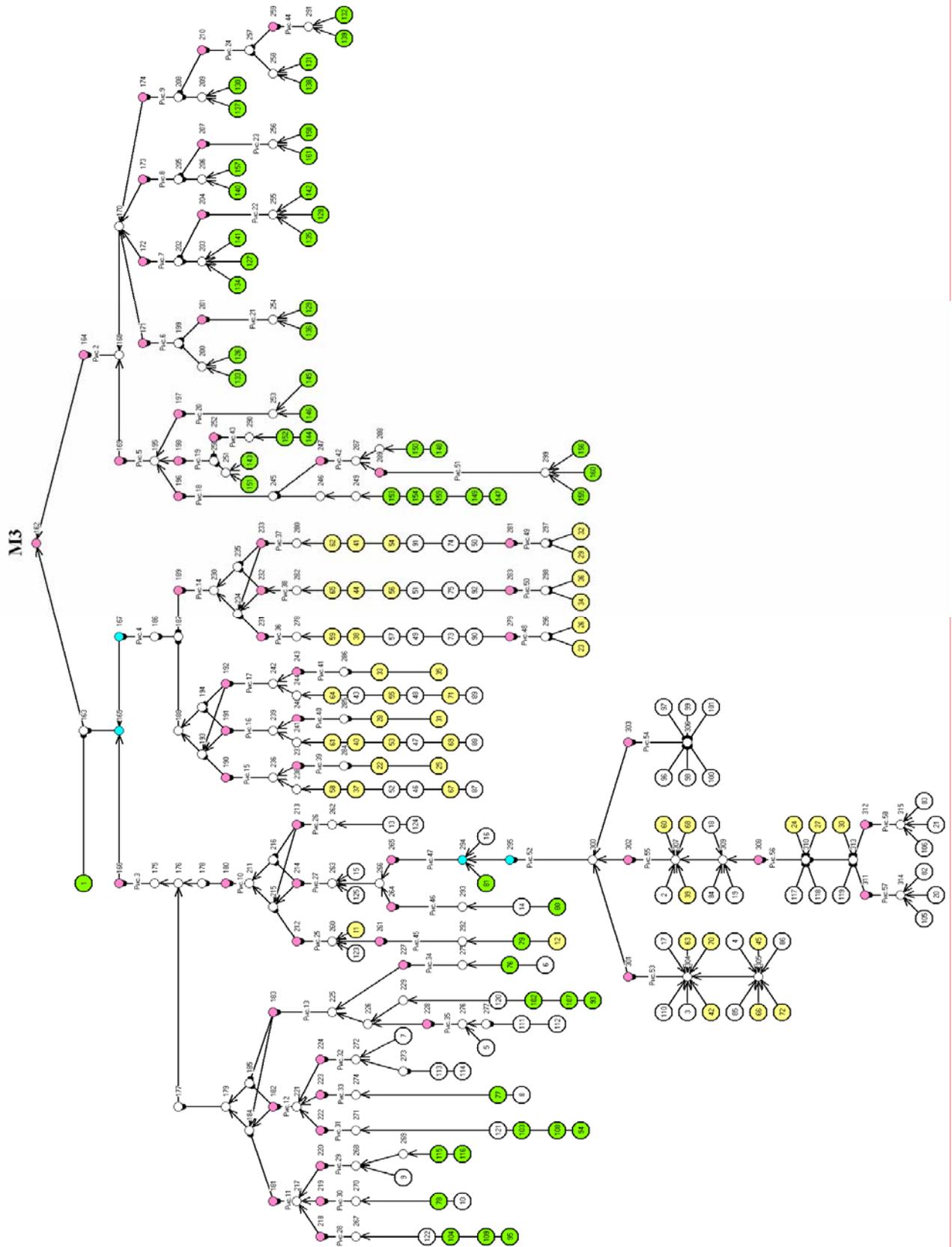
Полная СФЦ дерева отказов системы QV_3 (Контрольный пример 1):



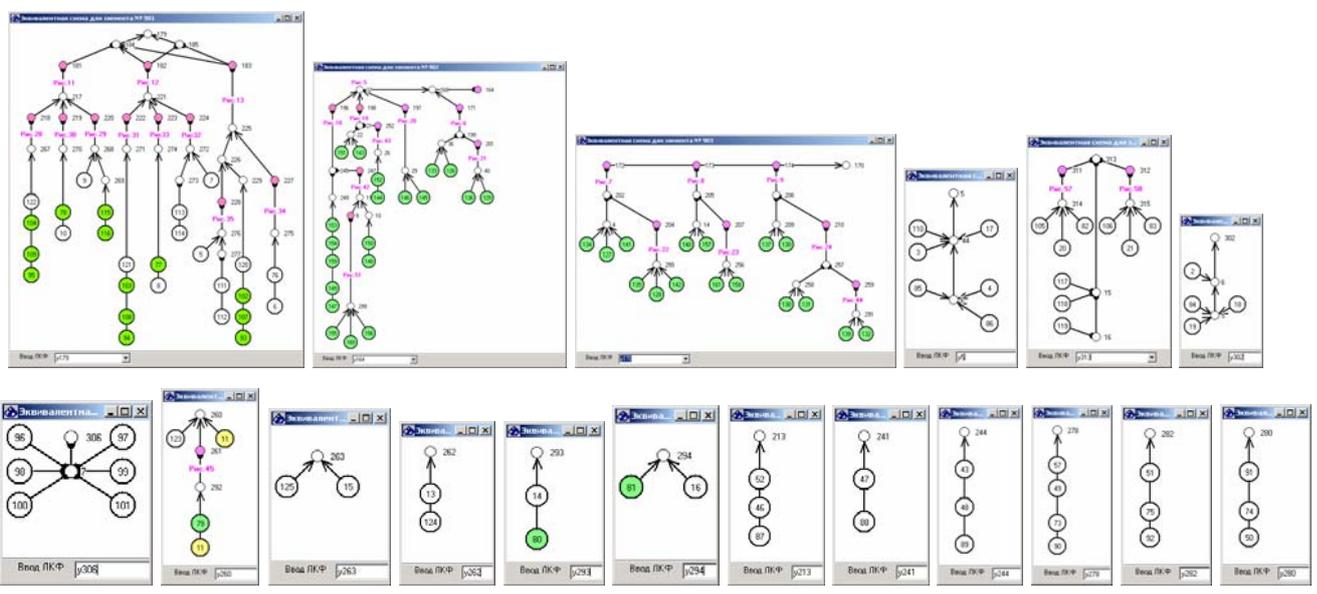
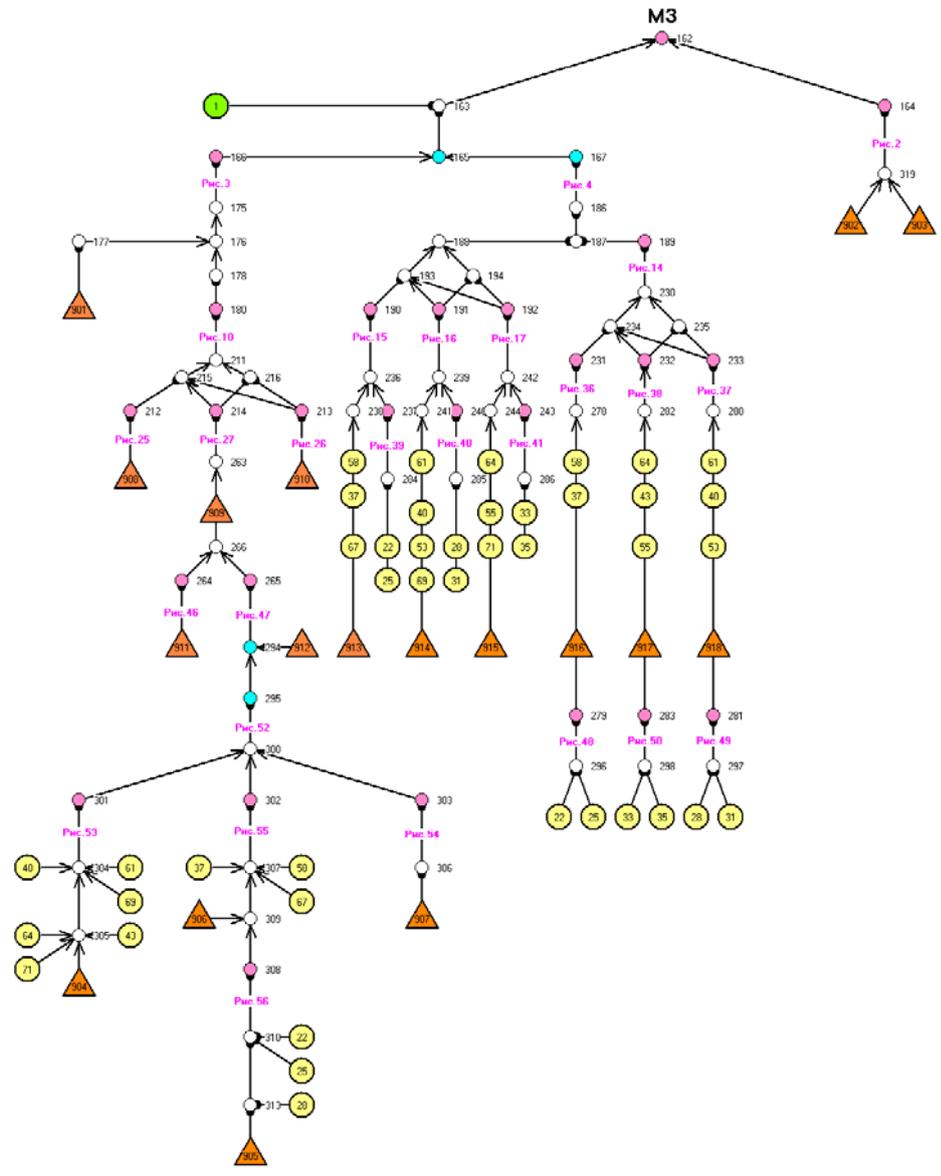
Декомпозированная СФЦ дерева отказов системы QV_3 (Контрольный пример 1):



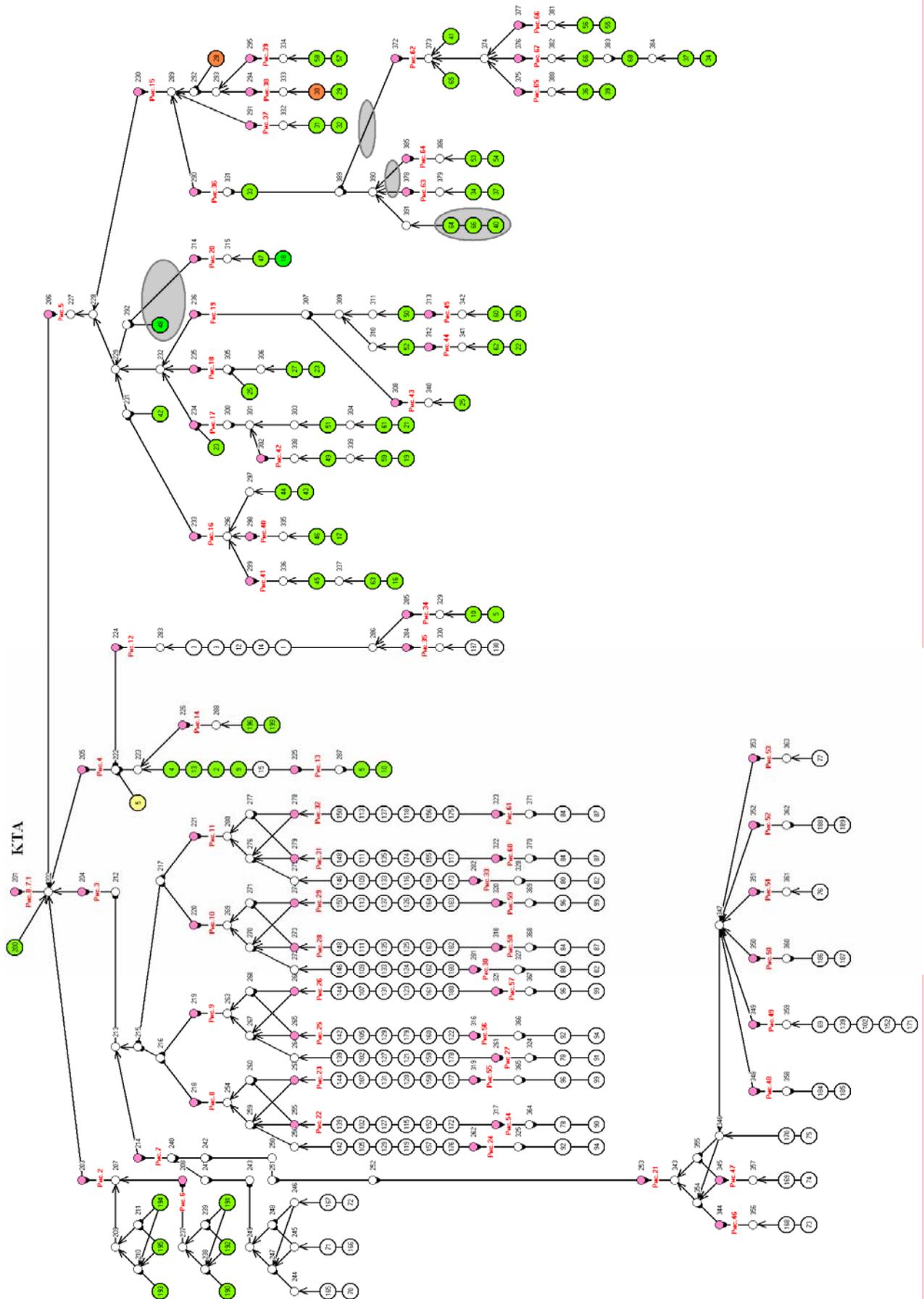
Полная СФЦ дерева отказов системы МЗ (Контрольный пример 3):



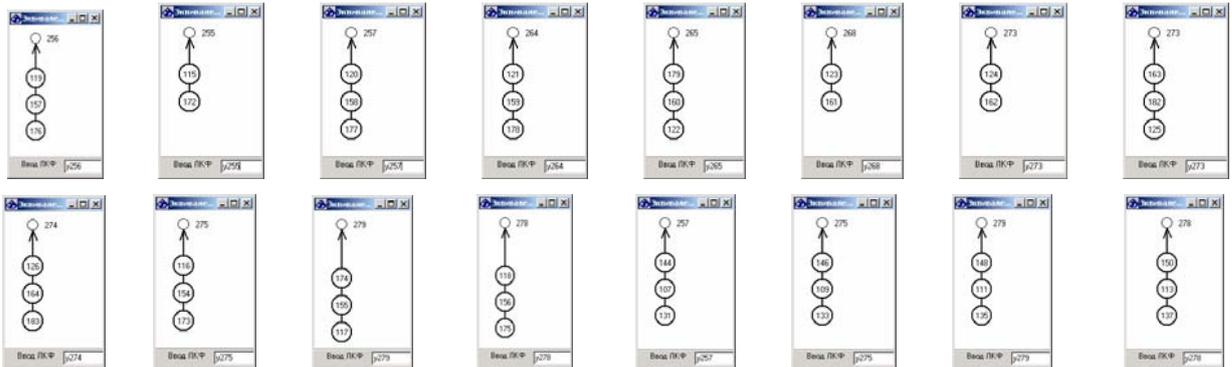
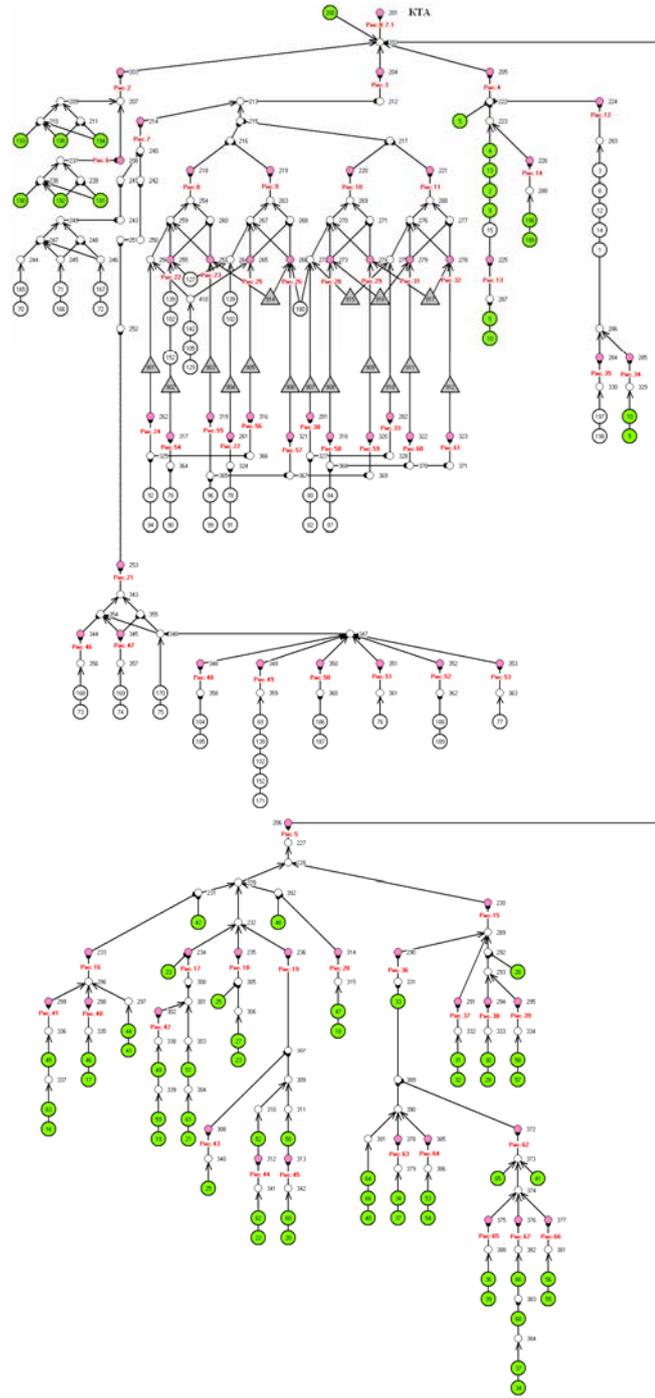
Декомпозированная СФЦ дерева отказов системы МЗ (Контрольный пример 3):



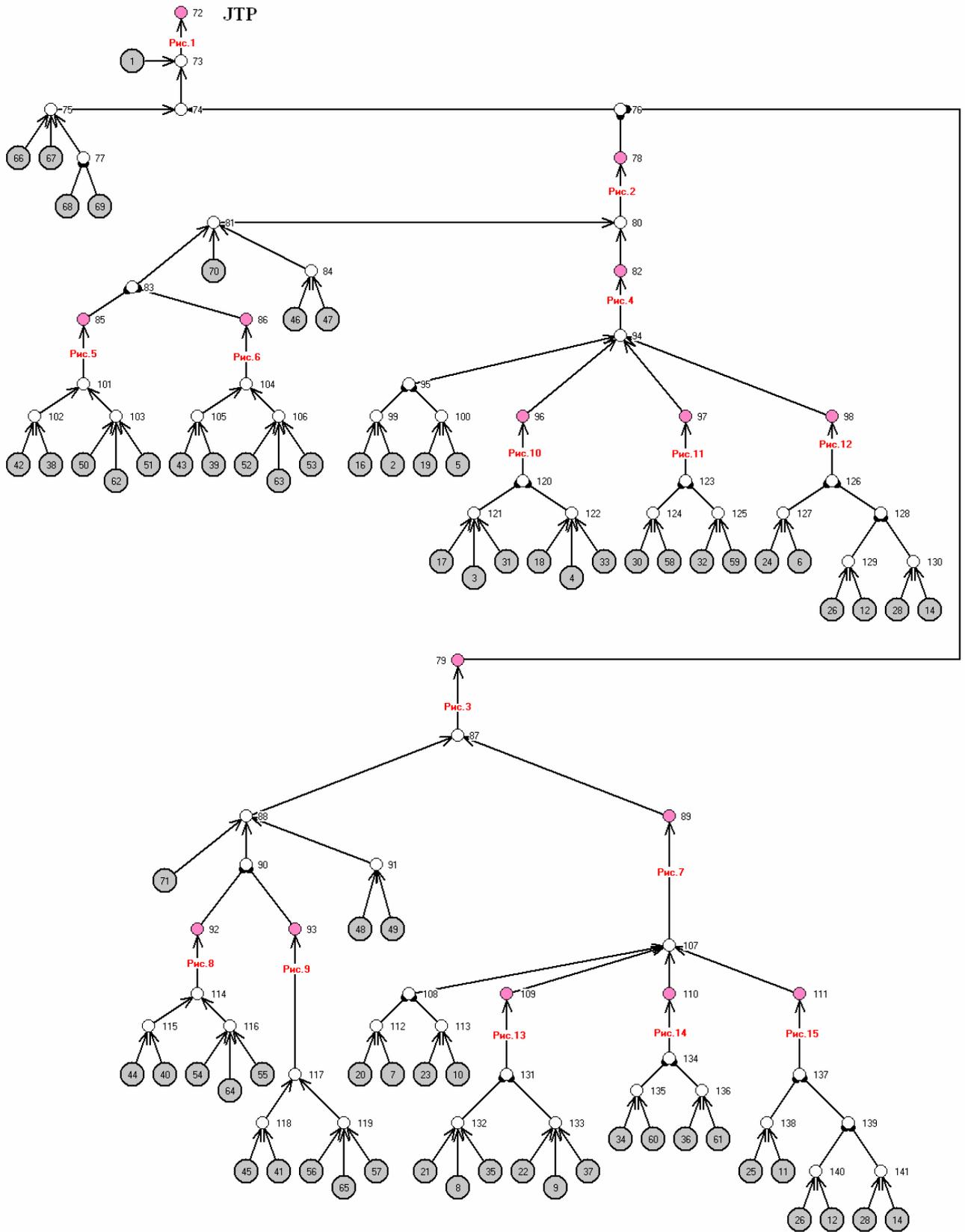
Полная СФЦ исправленного ДО системы КТА (Контрольный пример 4):



Декомпозированная СФЦ исправленного ДО системы КТА (Контрольный пример 4):



Полная СФЦ дерева отказов системы ЖТР (Контрольный пример 5):



Решения с помощью ПК АСМ СЗМА Контрольных примеров Задания оформлены в Описании (см. приложение 2) виде "**Задач**", которые имеют сквозную нумерацию от 1 до **10** включительно.

Большая часть приведенных в Задании Примеров решены ПК АСМ СЗМА двумя способами:

- На основе усеченной ФРС, включающей только те МСО, которые удовлетворяют заданному критерию отсечки (способ 1);
- На основе полной ФРС, представляющей все МСО ДО исследуемой системы (способ 2).

Решения каждого из пяти Примеров Задания выполнены в двух вариантах. **Первый вариант** составляют Задачи 1, 3, 5, 7 и 9. Их решения основываются на гипотезе о независимости в совокупности базисных событий деревьев отказов приведенных в Задании. Это позволяет подтвердить корректность моделирования и расчетов контрольных Примеров сопоставлением результатов ПК АСМ СЗМА с соответствующими данными, полученными с помощью открытого ПК **Saphire-7** [70]. При первом варианте решения Примеров (условие независимости отказов элементов) с помощью ПК АСМ СЗМА определены и сопоставлены с результатами ПК Saphire-7 следующие **показатели**:

1. Число конъюнкций полной или усеченной ФРС (МСО);
2. Форма каждого МСО (состав входящих в МСО базисных событий);
3. Вероятность реализации каждого МСО;
4. Вероятность реализации вершинного события ДО исследуемой системы (точное и/или приближенное);
5. Значимости элементов (базисных событий) по Fussell-Vesely;
6. Коэффициенты уменьшения риска отказов элементов (базисных событий) по Fussell-Vesely;
7. Коэффициенты увеличения риска отказов элементов (базисных событий) по Fussell-Vesely;
8. Число вхождений базисных событий в МСО.

Из **2369** определенных ПК АСМ СЗМА значений указанных показателей, все совпали с результатами, полученными с помощью ПК Sapphire-7.

Для вариантов Задач 1, 3 и 5 дополнительно вычислены **точные** значения вероятностей реализации вершинных событий соответствующих деревьев отказов. Это позволило установить, какой способ моделирования и приближенных расчетов (на основе усеченной или на основе полной ФРС) дает более точную оценку вероятности вершинного события. Во всех случаях более точной оказалась оценка вероятности вершинного события, полученная на основе усеченного, а не полного набора МСО логической модели исследуемой системы.

Второй вариант составляют решения Задач 2, 4, 6, 8 и 10. В этих вариантах решений использованы специальные методы расчета показателей, разработанные в ОКБМ и впервые реализованные в аттестованном ПК "CRISS 4.0" [69]. Указанные методы позволяют учесть три типа отказов элементов (базисных событий) – отказ на требование, отказ в режиме работы и скрытый отказ в режиме ожидания (разрешение на внедрение в ПК АСМ СЗМА указанных методов учета трех типов отказов базисных событий от автора было получено). Обоснование корректности решения задач этого класса с помощью ПК АСМ СЗМА осуществлялось сопоставлением полученных результатов с приведенными в Задании значениями следующих **показателей**:

1. Число конъюнкций усеченной ФРС (МСО);
2. Содержание каждого МСО (состав входящих в МСО базисных событий);
3. Вероятности базисных событий, вычисленные с учетом заданных параметров трех типов отказов элементов;
4. Вероятности реализации каждого МСО, вычисленные с учетом заданных параметров трех типов отказов элементов;
5. Значимости каждого МСО по Fussell-Vesely;
6. Суммарные значимости МСО по Fussell-Vesely;
7. Вероятности реализации вершинного события ДО исследуемой системы.

Из **1885** значений сопоставляемых показателей, совпало абсолютное большинство. Некоторое расхождение результатов имело место только в двух случаях (см. приложение 2).

Таким образом, решения Контрольных примеров показало практически полное совпадение результатов приближенного моделирования и расчетов показателей с помощью ПК АСМ СЗМА и с помощью комплексов "Saphire-7" и аттестованного "CRISS 4.0".

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ И ОБОСНОВАНИЯ ПК АСМ СЗМА

Представленный к аттестации Комплекс основан на глубоко и всесторонне разработанной отечественной теории логико-вероятностного моделирования надежности, живучести и безопасности структурно-сложных систем (научная школа ЛВМ академика Рябинина И.А [30-32]). Непосредственно в ПК АСМ СЗМА реализованы возможности одного из новых и перспективных направлений развития этой теории – **общего логико-вероятностного метода и схем функциональной целостности**, составляющих основу теории и технологии **автоматизированного структурно-логического моделирования** [4-13, 26, 27, 29, 33].

Комплекс используется отечественными специализированными организациями при проектировании и эксплуатации ОИАЭ и других ОПО [14-19, 43-54]. Материалы, приведенные в настоящем Отчете о верификации, позволяют заключить, что представленный к аттестации ПК АСМ СЗМА пригоден для решения заявленного класса задач автоматизированного моделирования и расчета вероятностных показателей свойств надежности (безотказности и восстанавливаемости, в соответствии с ГОСТ 27.002-89) и безопасности (вероятности возникновения или невозникновения аварийных ситуаций и аварий, вследствие отказов элементов [34]).

ПК АСМ СЗМА базовой версии 1.0 построен по модульному объектно-ориентированному принципу реализации программной системы, что существенно облегчает его дальнейшее усовершенствование, добавление функциональностей, модернизацию и адаптацию к новым классам задач и предметным областям. По своему составу, функциональные возможности ПК АСМ СЗМА являются базовыми в реализации технологии АСМ, и должны входить в новые, более совершенные и удобные отечественные специализированные версии программных комплексов, разрабатываемые на основе ОЛВМ, аппарата СФЦ и ПК АСМ СЗМА. Именно это было подчеркнуто в общих выводах НИР [20] (см. приложение 4, стр. 280) специалистами СПбАЭП, ИПУ РАН и ОАО "СПИК СЗМА", после

сравнительного анализа теории, технологии и ПК АСМ СЗМА с двумя известными зарубежными программными комплексами "Relex" и "Risk Spectrum".

Поэтому процедура аттестации данной базовой версии ПК АСМ СЗМА представляется своевременной и актуальной.

Изложенные выше материалы верификационного отчета позволяют в данном разделе сформулировать и обосновать те функциональные возможности и ограничения, которые характеризуют представляемую к аттестации базовую версию ПК АСМ СЗМА и входят в его аттестационный паспорт.

Обоснованность использования ОЛВМ и аппарата СФЦ

Материалы настоящего верификационного отчета подтверждают полноту разработки и логическую универсальность теоретической базы - **общего логико-вероятностного метода и аппарата схем функциональной целостности**, которые представляют теоретическую основу представленной к аттестации базовой версии ПК АСМ СЗМА. В этом Комплексе с помощью СФЦ могут представляться следующие виды типовых структур свойств надежности и безопасности (технического риска) систем:

- блок-схемы (см. примеры Тестов №1, 9, 10);
- графы связности (см. примеры Тестов №2, 6, 10);
- деревья отказов (см. Пример 3.5, примеры Тестов №5, 10, Контрольные примеры);
- деревья событий (см. примеры Теста №4).

Аппарат СФЦ позволяет строить новый класс немонотонных структурных моделей систем. Они необходимы, например, для анализа надежности и безопасности систем второго типа (ГОСТ 27.301-95), т.е. качественно-сложных объектов, которым свойственно функционирование в различных состояниях с разной эффективностью или уровнем возможного ущерба. Показателями безопасности качественно-сложных систем являются полные риски [34, 65], например, "ожидаемый ущерб" (см. пример 4.2).

Для расчета вероятностей аварийных ситуаций и аварий сложных систем требуется конкретный учет причин их возникновения, надежности средств противоаварийной защиты, вариантов развития послеаварийных процессов и т.п.. Для этого также требуется построение немонотонных моделей надежности и безопасности исследуемых систем (см. все примеры Теста №1). Поэтому немонотонные модели полезны и необходимы для анализа надежности и безопасности ОИАЭ и других ОПО. В настоящем отчете возможность ПК АСМ СЗМА строить и использовать в расчетах немонотонные модели качественно-сложных объектов, продемонстрирована в задачах Теста №1 и в примерах 4.3 и 4.4.

В ПК АСМ СЗМА реализована двухуровневая односвязная структурная декомпозиция. На первом уровне (без декомпозиции) основная СФЦ может представляться в ПК АСМ СЗМА размером до 400 вершин. Каждая функциональная вершина основной СФЦ первого уровня может быть эквивалентирована, и представлена СФЦ подсистемы второго уровня декомпозиции, объемом до 100 вершин каждая. Декомпозиция показала высокую эффективность как средство упрощения постановки задач (не требуется построение высокоразмерной общей СФЦ системы) и как средство борьбы с "проклятием размерности" логико-вероятностного моделирования. Это подтверждается примерами Тестов №9, 10 и Контрольными примерами настоящего отчета. В процессе развития и адаптации ПК АСМ СЗМА эта функциональность должна быть сохранена и реализована на множестве уровней декомпозиции. Такая версия ПК АСМ СЗМА находится в стадии разработки.

Важную дополнительную функциональность в ПК АСМ СЗМА привносит аппарат логических критериев функционирования. Он позволяет на одной и той же СФЦ ставить и решать задачи моделирования и расчета показателей различных свойств надежности и безопасности, учитывать разные режимы функционирования, исследовать как систему в целом, так и ее подсистемы. Это подтверждено примерами расчетного и аналитического Теста №1.

Поскольку в ПК АСМ СЗМА реализованы все возможности основного аппарата моделирования алгебры логики, постольку обеспечивается возможность решения одной и той же задачи, как в прямой, так и в обратной (противоположной, инверсной) постановке. Для этого достаточно заменить текущий ЛКФ его логической инверсией. В результате противоположного решения ПК АСМ СЗМА автоматически формирует противоположные математические модели и выполняет расчеты. Это означает, что построенные ПК АСМ СЗМА прямая и противоположная логические функции в свой логической сумме всегда должны давать точную логическую единицу (истина). Алгебраическая сумма прямого и обратного многочленов ВФ всегда должна приводить к константе "1". Наиболее просто подтвердить непротиворечивость прямого и обратного моделирования и расчетов в ПК АСМ СЗМА можно, сложив вероятностные показатели прямого и обратного решений (результат всегда должен быть равен единице). В верификационном отчете контрольные противоположные решения приведены в Примерах 1.1 – 1.4, 1.6, 2.5, 5.3, 6.1 и 8.3. В процессе экспертизы ПК АСМ СЗМА противоположные решения можно получить для всех примеров настоящего верификационного отчета. Только для задач (примеров 9.1, 9.2, Теста №10 и Контрольных примеров) решения могут быть очень долгими, из-за высокой размерности многочлена ВФ.

Автоматическое построение логических ФРС

ПК АСМ СЗМА позволяет на основе введенной СФЦ и заданного ЛКФ автоматически строить соответствующие **логические функции работоспособности** исследуемых свойств надежности и безопасности систем. Особенность решения этой задачи в ПК АСМ СЗМА заключается в том, что в Комплексе не используются традиционные процедуры считывания логической функции непосредственно с графа структурной схемы системы. Построение ФРС осуществляется с помощью библиотеки ЛОГ&ВФ [27] путем точного аналитического решения системы логических уравнений, соответствующей СФЦ исследуемой системы. Следует отметить, что понятие логической ФРС в ОЛВМ принято толковать расширенно. В понятии ФРС "работоспособность" означает соответствие полученной логиче-

ской функции заданному ЛКФ, который, в свою очередь, может представлять различные свойства надежности и безопасности исследуемого объекта (безотказность, отказ, не возникновение или возникновение аварии и т.п.).

Задача построения логической ФРС является экспоненциально сложной. Поэтому в программном модуле логического моделирования библиотеки ЛОГ&ВФ [27] применяются специальные методы и средства, позволяющие получать минимальные дизъюнктивные нормальные формы логических функций [26] и существенно ускорять выполнение в ПК АСМ СЗМА этапа логического моделирования.

В верификационном отчете приведены распечатки явных форм логических ФРС, сформированных ПК АСМ СЗМА при решении примеров 1.1 - 1.4, 2.2, 2.3, 2.6, 3.3, 3.4, 5.2, 8.1 и всех Контрольных примеров. Эти примеры показывают, что логическое моделирование в ПК АСМ СЗМА позволяет представлять кратчайшие пути успешного функционирования систем, минимальные сечения отказов, а также различные их немонотонные комбинации.

При построении логических ФРС высокоразмерных систем время моделирования и размеры функций могут быть значительными (см. примеры 9.1 и 9.2). Во многих случаях существенно сократить время логического моделирования без потери точности вероятностных расчетов, можно путем использования кратных вершин СФЦ и методов двухуровневой односвязной структурной декомпозиции СФЦ (см. примеры 9.2 и 9.3). Для традиционных приближенных расчетов (режим "Приближенный расчет") дополнительным средством преодоления проблемы размерности моделирования является механизм "Отсечки" маловероятных конъюнкций ФРС.

Автоматическое построение многочленов ВФ

ПК АСМ СЗМА на основе логических ФРС автоматически строит соответствующие расчетные **многочлены вероятностных функций**, с помощью которых вычисляются вероятностные показатели свойств надежности и безопасности исследуемых объектов (режимы "Статический расчет" и "Вероятностно-

временной расчет"). Задача построения многочленов ВФ является еще более экспоненциально сложной, чем задача логического моделирования. Поэтому в программном модуле вероятностного моделирования библиотеки ЛОГ@ВФ [27] используется специальный комбинированный метод [5], позволяющий сократить размерность и увеличить скорость вероятностного моделирования в ПК АСМ СЗМА.

В верификационном отчете приведены распечатки явных форм многочленов ВФ небольшой размерности, сформированных ПК АСМ СЗМА при решении примера 1.1. Для всех остальных примеров формируемые многочлены ВФ можно посмотреть на странице "Отчет" ПК АСМ СЗМА или в файле результатов rezasm.lst, предварительно включив признак "Вывод явной ВФ"..

Время вероятностного моделирования и требуемый ресурс оперативной памяти при анализе высокоразмерных систем могут быть значительными (см. примеры 9.1, 9.2 и все Контрольные примеры). Во многих случаях, существенно сократить время вероятностного моделирования и размеры многочленов ВФ можно, путем использования кратных вершин, а также методов и средств двухуровневой односвязной структурной декомпозиции СФЦ (см. примеры 9.2, 9.3, 9_1_кратность и 9_2_кратность).

Выполнение расчетов вероятностных показателей

Приведенные в данном отчете решения тестовых примеров показывают, что в рамках заявленной к аттестации функциональности с помощью базовой версии ПК АСМ СЗМА могут быть вычислены следующие вероятностные характеристики надежности и безопасности исследуемых систем:

- **статическая вероятность** оцениваемого системного события - безотказности, отказа, безопасность, риска возникновения аварийной ситуации или аварии и др. (Примеры 2.1, 3.1, все примеры Тестов №3-6, Контрольные примеры 1,3,5,7,9);
- **вероятность безотказной работы** невозстанавливаемой системы (все примеры Тестов №1 и №9, Пример 2.4);

- **средняя наработка до отказа** невосстанавливаемой системы (все примеры Тестов №1, №9, Пример 2.4);
- **коэффициент готовности** восстанавливаемой системы (Примеры 2.5, 3.2 и 3.5);
- **средняя наработка на отказ** восстанавливаемой системы (Примеры 2.5, 3.2 и 3.5);
- **среднее время восстановления** системы (Примеры 2.5, 3.2 и 3.5);
- **вероятность безотказной работы** (или отказа) восстанавливаемой системы (примеры 2.5, 3.2 и 3.5);
- **вероятность готовности** смешанной системы, состоящей из восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов (Пример 2.7);
- **положительный вклад** каждого отдельного элемента системы (см. все примеры Теста №1 и пример, 2.6, а для других примеров положительные вклады могут быть просмотрены на странице "Диаграммы" ПК АСМ СЗМА, Рис. 2, п.7, а также в файле результатов rezasm.lst);
- **значимость каждого** отдельного элемента системы (см. все примеры Теста №1, для других примеров отчета значимости могут быть просмотрены на странице "Диаграммы" ПК АСМ СЗМА, Рис. 2, п.7, а также в файле результатов rezasm.lst);
- **отрицательный вклад** каждого отдельного элемента системы (см. все примеры Теста №1, для других примеров отчета отрицательные вклады могут быть просмотрены на странице "Диаграммы" ПК АСМ СЗМА, Рис. 2, п.7, а также в файле результатов rezasm.lst);
- статические вероятности отказа или безотказной работы системы с учетом типовых и нетиповых моделей отказов по общей причине (примеры Теста №6 и Теста №7);
- вероятностные показатели надежности **комбинаторных подсистем** малой и большой размерности (примеры Теста №8);
- вероятностные показатели **высокоразмерных систем** при двухуровневой декомпозиции и построении составной СФЦ (примеры Теста №9);

- приближенные расчеты **вероятностей вершинных событий ДО значимостей и коэффициентов увеличения и уменьшения риска МСО и элементов по Fussell-Vesely без учета и с учетом трех типов отказов элементов** (все Контрольные примеры).

Все точные расчеты в ПК АСМ СЗМА выполняются на основе многочлена ВФ или с помощью трех вспомогательных расчетных утилит. Приближенные расчеты выполняются на основе логической ФРС.

Дополнительные сведения об ограничениях ПК АСМ СЗМА

При установке в ПК АСМ СЗМА режима "Статический расчет" (см. Рис. 2, п.5) все вычисления выполняются на основе явно заданных вероятностей p_i элементарных событий, записанных в столбце P_i таблицы задания параметров элементов (см. Рис. 2, п.5). При этом если все элементарные события в СФЦ являются независимыми в совокупности, то собственные статические вероятности p_i могут иметь значения во всем диапазоне от 0 до 1 включительно. Если в модели системы есть группы несовместных событий, то сумма вероятностей их несовместных исходов не должна превышать 1.0 (см. условие нормировки (44)). Если это условие нарушено, то ПК АСМ СЗМА выдает соответствующее предупредительное сообщение, после закрытия, которого, завершает вычисления с заданными параметрами элементов. Однако, эти результаты, в общем случае, являются ошибочным (из-за нарушения нормировки параметров ГНС). В верификационном отчете с использованием аппарата ГНС были решены примеры Теста №7.

При установке в ПК АСМ СЗМА режима "Вероятностно-временной расчет" (см. Рис. 2, п.5) все вычисления выполняются на основе параметров элементов, указанных в столбцах "Тоi" (средняя наработка до отказа элемента в годах) и Твi (среднее время восстановления элемента в часах). Используемая при расчетах общая наработка t системы задается в окне "Т=" панели установки режимов моделирования и расчетов ПК АСМ СЗМА (см. Рис. 2, п.5). Для учета значений собственных наработок $t_{ri} < t$ элементов части элементов, эти значения записываются в столбец "Tri" таблицы параметров и устанавливается признак "Учет

времени работы элементов" (см. Рис. 2 п.5 и пример 1.6). При этом в зависимости от состава параметров элементов, комплекс автоматически использует либо процедуру вычисления коэффициента готовности элемента, либо процедуру вычисления вероятности его безотказной работы. Далее вычисленные вероятностные характеристики системы используются в расчетах соответствующих общесистемных вероятностно-временных показателей (коэффициента готовности или неготовности восстанавливаемой систем, вероятности безотказной работы или отказа невосстанавливаемой системы и вероятности готовности или неготовности смешанной системы).

При установке режима "Приближенный расчет" корректность вычисления вероятностных характеристик обеспечивается (как и в ПК Risk Spectrum, CRISS 4.0) для монотонных моделей деревьев отказов (МСО) при собственных вероятностях базисных событий < 0.01 (все Контрольные примеры).

В ПК АСМ СЗМА "по умолчанию" функциональные вершины с вероятностно-временными параметрами надежности всегда представляют прямой исход (безотказность, готовность и т.п. элемента) для которого автоматически вычисляются соответствующие вероятностные характеристики. Поэтому в деревьях отказов с вероятностно-временными параметрами элементов необходимо вводить в СФЦ функциональные вершины базовых событий, которые представляют не отказ элемента, а его безотказность. Чтобы далее построить СФЦ дерева отказов, надо использовать инверсные выходы указанных вершин. Эта особенность ПК АСМ СЗМА продемонстрирована в ходе решения тестового примера 3.5.

В ПК АСМ СЗМА расчеты дополнительных вероятностно-временных показателей надежности (средней наработки до отказа, средней наработки на отказ, среднего времени восстановления и вероятности безотказной работы восстанавливаемой системы) выполняются только на основе прямых монотонных моделей безотказности или готовности исследуемых объектов. Во всех остальных случаях (модели отказа или немонотонные модели систем) рассчитываются только общесистемные вероятностные характеристики (вероятность безотказной работы или

коэффициент готовности системы) и соответствующие значимости и вклады элементов. Способ преодоления этого ограничения рассмотрен в примере 2.5.

По умолчанию в ПК АСМ СЗМА устанавливается параметр "Размер ФРС и ВФ" равным 5 000 (см. Рис. 2, п.5). Пользователь может произвольно изменять значение этого параметра, сообразуясь с объемом решаемой задачи и размерами оперативной памяти ПЭВМ.

Если в процессе моделирования размерность автоматически формируемой логической ФРС превысит заданное значение "Размер ФРС и ВФ", то ПК АСМ СЗМА выдаст предупреждение о приостановке процесса моделирования и расчетов. В этом случае пользователь должен принять меры для решения проблемы размерности логического моделирования: увеличить значение параметра "Размерность ФРС и ВФ", декомпозировать СФЦ, использовать аппарат кратности, перейти в режим "Приближенный расчет" с Отсечкой и др. (см. примеры Теста №9 и Теста №10).

Если в процессе моделирования ПК АСМ СЗМА сформирует логическую ФРС, а заданного "Размер ФРС и ВФ" окажется недостаточно для построения точного многочлена ВФ, выдается соответствующее предупреждение. После его закрытия Комплекс прекращает построение многочлена ВФ и автоматически производит приближенные расчеты вероятностных характеристик системы на основе логической ФРС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приводится текст проекта аттестационного паспорта ПК АСМ СЗМА, утвержденный 21 ноября 2006 г. на заседании Секции №5 Совета по аттестации ПС.

Проект

АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ ПС

Название программного средства: "Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0)".

ЭВМ: ПЭВМ, компьютер класса IBM-PC с процессором Pentium II и выше.

Операционная система: WINDOWS, ПС может использоваться в операционной системе, поддерживающей интерфейс разработки приложений Win32 API (Windows 95, Windows 98, Windows Me, Windows NT, Windows 2000, Windows XP, Windows 2003).

Язык программирования: Borland Object Pascal, среда разработки Borland Delphi Professional, Version 7.0 (Build 4.453).

Имя автора (авторов): Можаяев А.С.

Организация-заявитель: Открытое акционерное общество "Специализированная инжиниринговая компания "Севзапмонтажавтоматика", ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург.

Организация-разработчик: Открытое акционерное общество "Специализированная инжиниринговая компания "Севзапмонтажавтоматика", ОАО "СПИК СЗМА", Санкт-Петербург.

Решение Совета по аттестации программных средств:

Аттестовать сроком на 10 лет.

Приложение: на 3 стр.

М.П.

Председатель Совета по аттестации ПС

В. И.О. Ученого Секретаря Совета по аттестации ПС

И.Р. Уголева

С.Н. Ложкин

ПРИЛОЖЕНИЕ К АТТЕСТАЦИОННОМУ ПАСПОРТУ ПС № _____

Программный комплекс АСМ СЗМА, базовая версия 1.0

1. Перечень регистрируемых программных модулей, их регистрационный номер в ЦЭП:

Программа не содержит отдельно регистрируемых модулей.

2. Назначение и область применения ПС

2.1. Назначение

- автоматизированное моделирование и расчет показателей надежности структурно-сложных систем, включая объекты использования атомной энергии (ОИАЭ) и другие опасные производственные объекты (ОПО);
- автоматизированное моделирование и расчет вероятностей возникновения (невозникновения) аварийных ситуаций и аварий опасных производственных объектов, включая ОИАЭ.

2.2. Тип объекта использования атомной энергии

- АЭС с реакторами любых типов;
- радиационные источники, пункты хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилища радиоактивных отходов.

2.3. Режимы

Все режимы.

2.4. Ограничения на применение

4. Нельзя использовать для проведения ВАБ ЯЭУ в целом.
5. Использование только экспоненциального закона распределения времени безотказной работы и восстановления элементов.
6. Число уровней односвязной структурной декомпозиции схем функциональной целостности (СФЦ) исследуемых системных объектов ≤ 2 .
7. Задание групп размноженных функциональных вершин, групп несовместных событий (ГНС) и отказов по общей причине (ООП) допускается только в пределах основной и/или отдельных декомпозированных СФЦ подсистем.
8. Максимальное количество элементов мажоритарных систем $N \leq 8$.
9. Максимальное количество элементов в группе ООП ≤ 8 .
10. Нельзя использовать для проведения анализа неопределенности и автоматизированного анализа чувствительности.

2.5. Допустимые значения параметров:

1	Вершины СФЦ	–	функциональные, фиктивные, эквивалентированные
2	Дуги СФЦ	–	конъюнктивные прямые, конъюнктивные инверсные,

			дизъюнктивные прямые, дизъюнктивные инверсные
3	Число уровней декомпозиции	–	2
4	Число вершин основной СФЦ	–	до 400
5	Число вершин подсистем СФЦ	–	до 100
6	Значения вероятностей элементарных событий	–	от 0.0 до 1.0 включительно
7	Количество элементов в одной группе ООП при прямом отображении ООП на графе	–	до 4
8	Количество элементов в одной группе ООП при автоматизированном учете ООП	–	до 8
9	Количество элементов в одной группе ООП при использовании встроенной утилиты	–	до 8
10	Число комбинаторных связей (N) при прямом отображении условий мажоритарности на графе	–	до 8
11	Число комбинаторных связей (N) при использовании утилиты агрегирования	–	до 30
12	Число комбинаторных связей (N) при использовании утилиты формирования комбинаций	–	до 20

2.6. Погрешность, обеспечиваемая в области допустимых значений параметров:

Погрешность приближенного расчета вероятности безотказной работы (отказа) восстанавливаемой системы определяется неравенством $\mu_i \gg \lambda_i$ ($T_{Oi} \gg T_{Bi}$).

Погрешность вычисления средней наработки до отказа невосстанавливаемой системы, определяемая на основе декомпозированной СФЦ и/или СФЦ с кратными вершинами, определяется числом дизъюнктивных декомпозированных подсистем и дизъюнктивных кратных элементов. Чем меньше число таких подсистем и элементов, тем точность выше.

Точность вычисления показателей надежности на основе усеченных ФРС определяется числом отсекаемых конъюнкций из общего числа конъюнкций логической функции (МСО, КПУФ или их немонотонных комбинаций). Чем меньше порог отсека, тем точность выше.

3. Сведения о методиках расчета, используемых в ПС

В основе методик расчета, используемых ПК АСМ СЗМА, лежит общий логико-вероятностный метод, являющийся дальнейшим развитием известных логико-вероятностных методов на общий класс монотонных и немонотонных моделей систем. В ходе моделирования и расчета последовательно разрабатываются графическая модель надежности (безопасности), на ее основе – функция алгебры логики (логическая функция работоспособности или неработоспособности), которая преобразуется в расчетный вероятностный многочлен (вероятностную функцию), используемый для расчета заданных показателей надежности и безопасности.

Графическая модель надежности (безопасности) технических систем строится с помощью аппарата схем функциональной целостности. Данный аппарат позволяет также строить деревья отказов и деревья событий, отличающиеся от традиционных только использованием других графических элементов.

На основе СФЦ автоматически формируется логическая функция (ЛФ) надежности и/или безопасности исследуемой системы в виде множества кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ), минимальных сечений отказов (МСО) или их немонотонные комбинации. При этом используются методы булевой алгебры.

На основе ЛФ автоматически формируется точный многочлен расчетной вероятностной функции. При этом также используются методы булевой алгебры, позволяющие преобразовать одну форму функции алгебры логики в другую (в ортогональную, неповторную и т.п.).

4. Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в ПС

Не содержит.

5. Перечень организаций, которым разрешена эксплуатация ПС

Открытое акционерное общество "Специализированная инжиниринговая компания "Севзапмонтажавтоматика" (ОАО "СПИК СЗМА"), Санкт-Петербург.

Межотраслевой экспертно-сертификационный, научно-технический и контрольный центр ядерной и радиационной безопасности (РЭСцентр), Санкт-Петербург.

ЗАО Трест "Севзапмонтажавтоматика", Санкт-Петербург.

ОАО "Гипровостокнефть", г. Самара.

6. Дополнительная информация

Нет.

7. Особые условия

Нет.

8. Официальные эксперты (Ф.И.О., место работы, занимаемая должность)

Г.А. Ершов, СПБАЭП, ведущий научный сотрудник, д.т.н.

Г.А. Ершов

А.И. Елизаров, ВНИИАЭС

А.И. Елизаров

В. Б. Морозов, АЭП, главный инженер БКП-5

В. Б. Морозов

А.М. Бахметьев, ОКБМ, начальник отдела

А.М. Бахметьев

Г.И. Самохин, НТЦ ЯРБ, начальник лаборатории анализа риска

Г.И. Самохин

В. И.О. Ученого Секретаря Совета по аттестации ПС

С.Н. Ложкин

Председатель Секции № 5

Совета по аттестации

Г.А.Ершов

ПЕРЕЧЕНЬ ИСТОЧНИКОВ

1. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА). СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611101 об официальной регистрации программ. Автор: Можаяев А.С. Правообладатель: ОАО "СПИК СЗМА". М.: Роспатент РФ, 2003. Internet сайт: <http://www.szma.com>.
2. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА). Основы теории. Инструкция пользователя. Описание программы. Текст программы. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2002. -142 с.
3. Нозик А.А., Можаяев А.С., Потапычев С.Н., Скворцов М.С. Программный комплекс автоматизированного моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования. // Материалы III Международной научно-практической конференции: "Моделирование. Теория, методы и средства". Часть 1. Новочеркасск: НПИ, 2003, С.28-35.
4. Можаяев А.С. Технология и программный комплекс автоматизированного моделирования и оценки надежности, безопасности и риска опасных производственных объектов. // Пятый тематический семинар: "Об опыте декларирования промышленной безопасности и страхования ответственности. Развитие методов оценки риска аварий на опасных производственных объектах". М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. НТЦ "Промышленная безопасность", 2005, с.50-58.
5. Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем. Уч. пос. Л.: ВМА, 1988. -68с.
6. Можаяев А.С. Теоретические основы и опыт структурно - логического автоматизированного моделирования и анализа систем. // В кн. "Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики", Вып.41. Вычислительные модели исследования надежности электроэнергетических систем. Сопоставительный анализ. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1991, с.91-105.
7. Можаяев А.С. Теория и практика автоматизированного структурно-логического моделирования систем. // Доклады международной конференции по информатике и управлению. (ICI & C') Том 3. СПб.: СПИИРАН, 1997, с.1109-1118. Mozhaev A.S. Theory and practice of automated structural-logical simulation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). Vol. 3. St.Petersburg: SPIIRAS, 1997, p.1109-1118
8. Акт о внедрении научно-исследовательских и учебно-методических работ д.т.н., профессора Можаяева А.С. в Военно-Морском Инженерном Институте, 21.02.2002 г.

9. Можаяев А.С., Алексеев А.О., Громов В.Н. Автоматизированное логико-вероятностное моделирование технических систем. Руководство пользователя ПК АСМ версии 5.0. СПб.: ВИТУ, 1999, 63 с.
10. Можаяев А.С., Алексеев А.О., Сорокин Р.П. Методика автоматизированного логико-вероятностного моделирования систем. (Программный комплекс "ПК АСМ, версия 5.0"). СПб.: ВМА, 1999, 121 с.
11. Можаяев А.С., Ершов Г.А, Татусьян О.В. Автоматизированный программный комплекс для оценки надежности систем. (ПК АСМNEW, версия 2.01). СПб.: ВВМИУ им. Ф.Э. Дзержинского, 1994.
12. Акт о внедрении научных и практических результатов работ д.т.н, профессора Можаяева А.С. в Научно-Исследовательском Центре безопасности технических систем МО РФ от 18.03.2002 г.
13. 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. Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099. М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003.
14. Девочкин В.А., Масленников И.А., Гаенко В.П., Лобынцев В.В. Оценка рисков и безопасности технологий по подъему АПК "Курск". Сайт "Российский подводный флот" <http://rpf.ru/txt/04/04/21-010004.html>
15. Расчеты показателей надежности объекта № 635 (Центральное хранилище изотопов), расположенного на территории ФГУП "Северное машиностроительное предприятие", г. Северодвинск (отчет рег. № Р-03/05 от 25.01.2005 г. по договору № 04/739/2506965 от 10.03.2004 г. между ФГУП "ПО "Севмаш и ООО "РЭСцентр");
16. Программа управления надежностью (ресурсом) объекта использования атомной энергии (объект использования атомной энергии – объект № 635 ФГУП "ПО "СЕВМАШ", склад изотопов, центральное хранилище изотопов)). СПб.: РЭСцентр, рег. № Р-21/05, 2005, 45 с.
17. Методики определения остаточного ресурса объектов использования атомной энергии. Инв. № 25.11-1.03.137-2004, ФГУП "ПО "Северное машиностроительное предприятие", г. Северодвинск, 2004.
18. Ибадулаев В.А., Космачев В.П., Можаяев А.С., Степанов И.В., Павлов П.М., Филатов В.С. Расчет риска эксплуатации установки первичной переработки нефти ЭЛОУ-АТ-6. // Электронный научно-технический журнал "Промышленная безопасность труда", № 8, 2004. http://www.alf-center.com/pbt/magazine8/article_1.html
19. Рылов М.И., Камынов Ш.В., Анисимов Н.А., Можаяев А.С., Никитин В.С. Оптимизация риска при утилизации АПЛ. // Управление риском №3, 2003, с.25-32.

20. 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.
21. Викторова В.С., Кунтшер Х., Петрухин Б.П., Степанянц А.С. Relex - программа анализа надежности, безопасности, рисков. // "Надежность", №4(7), 2003, с. 42-64.
22. Relex - программа анализа надежности, безопасности, рисков. Компания Relex Software Corporation (США).
<http://www.relexsoftware.com/about/index.asp> .
23. Программный комплекс "Risk Specnrum" Шведской фирмы "Relcon AB". Internet, сайт <http://www.riskspectrum.com> .
24. Risk Spectrum PSA Professional 1.20 / Teory Manual. RELCON AB, 1998. -57p.
25. Risk Spectrum Professional. Руководство пользователя. // Техническая документация к программному комплексу фирмы By Relcon AB. -119с.
26. 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.
27. Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ & ВФ). СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611100 об официальной регистрации программ. Авторы: Можаяев А.С., Гладкова И.А. Правообладатель: Можаяев А.С. М.: Роспатент РФ, 2003.
28. Константинов Б.А., Лосев Э.А. Логико-аналитический метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения. // "Электричество", №12, 1971.
29. Можаяев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. СПб.: ВИТУ, 2000. –145 с.
30. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981, -286 с.
31. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
32. Рябинин И.А. Задача №35 и история ее исследований. // Труды Международной научной школы: "Моделирование и анализ безопасности, риска в сложных системах" (МА БР – 2004). СПб.: СПбГУАП, 2003, с.408-416.

33. Ершов Г.А., Козлов Ю.И., Солодовников А.С., Можаяев А.С. Оценка безопасности атомных энергетических объектов на стадии проектирования. // Журнал "Тяжелое машиностроение", № 8/2004, М.: ООО "Дом печати "Столичный бизнес", 2004. с. 33-39.
34. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. // Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Выпуск 10. М.: ГУП "НТЦ ПБ" Госгортехнадзора России, 2001. - 60с.
35. Рылов М.И., Камынов Ш.В. (РЭСцентр), Анисимов Н.А. (ЦНИИ им. А.Н. Крылова), Можаяев А.С. (СПИК «Севзапмонтажавтоматика»), Никитин В.С. (НИПТБ «Онега»). Использование классических критериев принятия решений при выборе мероприятий по снижению экономического ущерба от ядерных и радиационных аварий. // Атомная энергия, Т. 97, вып. 1, июль 2004, с 54-60.
36. Положение об аттестации программных средств, применяемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии (РД-03-17-2001). М.: Госатомнадзор России, 2001, 16 с.
37. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (РД-03-34-200). М.: Госатомнадзор России, 2000, 21 с.
38. Гордон Б.Г. Идеология безопасности. М.: Труды НТЦ ЯРБ, 2005 г., - 117 с.
39. Калиберда И.В. Качество и надежность программных средств, используемых для обоснования безопасности в области прочности и устойчивости к внешним воздействиям. // Вестник Госатомнадзора России № 1, 2003 г.
40. Черкесов Г. Н., Можаяев А.С. Логико-вероятностные методы расчета надежности структурно-сложных систем. // В кн.: Надежность и качество изделий. М.: Знание, 1991, с.34-65.
41. Обломский С.Б., Ибадулаев В.А., Космачев В.П. Поздняков В.А., Ермоленко А.Д., Маркелова В.А. и др. Расчетно-пояснительная записка к плану локализации и ликвидации аварийных ситуаций установки ЭЛОУ-АТ-6 в составе ООО «ПО» Киришинефтеоргсинтез» СПб: АНО «РНТЦ ЧС», ООО «Ленгипронефтехим», 2005, - 380 с.
42. Нозик А.А. Оценка надежности и безопасности структурно-сложных технических систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб.: СПИИРАН, 2005. -168 с.
43. 01.039.6-10.АТХ.ОН. ООО «КИНЕФ». Автоматизированная система управления технологическим процессом насосной 910-45 и относящихся к ней резервуарных парков АСУТП 910-45. Проектная оценка надежности системы. СФЦ содержит 441 вершину, 333 элемента,16 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2001 г. -72с.

44. 02.008.6-10.АТХ.ОН. ООО «КИНЕФ». Автоматизированная система управления технологическим процессом газофракционирующей установки АСУТП ГФУ. Проектная оценка надежности системы. СФЦ содержит 108 вершин, 94 элемента, 13 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2002 г. -31с.
45. 02.022.6-10.АТХ.ОН. ООО «КИНЕФ». Автоматизированная система управления технологическим процессом пожаротушения резервуарного парка об. 910-27 от существующей системы пожаротушения (АСУТП ПТ 910-27). Проектная оценка надежности системы. СФЦ содержит 87 вершин, 79 элемента, 4 функции. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2002 г. -21с.
46. 02.043.6-10.АТХ.ОН. МОЗЫРСКИЙ НПЗ. Моделирование и расчет показателей надежности комплекса технических средств автоматизированной системы управления парка сжиженных газов ТСБ, расширение. Технический отчет. СФЦ содержит 393 вершины, 111 элементов, 22 функции. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2003 г. -81с.
47. 03.002.6-10.АТХ.ОН. ООО «КИНЕФ». Автоматизированная система управления технологическим процессом пожаротушения резервуарных парков товарно-сырьевой базы нефти, относящихся к ОПУ1. (АСУТП ПТ ТСБН-1). Проектная оценка надежности системы. СФЦ содержит 60 вершин, 52 элемента, 5 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2003 г. -23 с.
48. 03.035.6-10.АТХ.ОН. ООО «КИНЕФ». Автоматизированная система управления технологическим процессом пожаротушения резервуарных парков товарно-сырьевой базы нефти, относящихся к ОПУ2 и ОПУ3. (АСУТП ПТ ТСБН-2/3). Проектная оценка надежности системы. СФЦ содержит 115 вершин, 110 элементов, 5 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2003 г. -22 с.
49. 03.052.6-10.АТХ.ОН. ООО «КИНЕФ». Замена оборудования 1 потока установки ЛГ-24/7 с переводом всей установки на АСУТП с заменой полевого КИПа. Проектная оценка (расчет) надежности системы. СФЦ содержит 134 вершины, 87 элементов, 6 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2003 г. -25 с.
50. 04.019.6-10-АТХ.ОН. ОАО «Казаньоргсинтез». САУиР компрессорных агрегатов установки Э-200. Проектная оценка (расчет) надежности системы. СФЦ содержит 89 вершин, 68 элемента, 5 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2004 г. -23 с.
51. 04.026.6-10-АТХ.ОН. ОАО «Казаньоргсинтез». САУ и Р воздушных компрессоров. Проектная оценка (расчет) надежности системы. СФЦ содержит 10 вершин, 8 элементов, 2 функции. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2004 г. -17с.
52. 04.066.2-10-АТХ.ОН. МОЗЫРСКИЙ НПЗ. Моделирование и расчет показателей надежности автоматизированной системы противоаварийной защиты секции 400 установки ЛК-6У№1 (ПАЗ С-400 ЛК-6У №1) Технический отчет. СФЦ содержит 150 вершин, 111 элементов, 6 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2004 г. -31 с.

53. 04.065.2-10-АТХ.ОН. МОЗЫРСКИЙ НПЗ. Моделирование и расчет показателей надежности автоматизированной системы противоаварийной защиты секции 100 установки ЛК-6У№1 (ПАЗ С-100 ЛК-6У №1). Технический отчет. СФЦ содержит 164 вершины, 122 элемента, 7 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2004 г. -34 с.
54. 04.067.2-10-АТХ.ОН. МОЗЫРСКИЙ НПЗ. Моделирование и расчет показателей надежности автоматизированной системы противоаварийной защиты эстакады слива нефти, мазута, вакуумного газойля (ПАЗ КЭСНМВГ). Технический отчет. СФЦ содержит 83 вершин, 71 элемент, 6 функций. СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2004 г. -29 с.
55. Код "РИСК" для выполнения стандартных вероятностных расчетов. М.: ОЦРК, <http://www.insc.ru/PSA/risk.html>.
56. Аракчеева Е.О., Бахметьев А.М., Былов И.А. Программный комплекс "CRISS 4.0" для проведения вероятностного анализа безопасности. Н.Новгород: ФГУП ОКБМ им. Африкантова. <http://www.nuclear.ru/productions/view.html?From=25&cat=42>.
57. Рябинин И.А. Феномен логико-вероятностного исчисления. // Труды Международной Научной Школы МА БР – 2005: "Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах" СПб.: ГОУ ВПО "СПбГУАП", 2005. -422 с.
58. Безкорвайный М.М., Костогрызов А.И., Львов В.М. Инструментально-моделирующий комплекс для оценки качества функционирования информационных систем "КОК". Руководство системного аналитика. М.: "Синтега", 2000. – 116 с. <http://www.bolero.ru/index.php?level=4&pid=22418086>.
59. Викторова В.С., Степанянц А.С. Программа прогнозирования надежности и безопасности технических систем на основе логико-вероятностных методов "RAY". М.: ИПУ РАН. <http://www.ipu.rssi.ru/kommer/vikt/Rmain.htm>
60. Можаяев А.С. Технология автоматизации процессов построения логико-вероятностных моделей систем. // Труды Международной научной конференции "Интеллектуальные системы и информационные технологии в управлении". ИСИТУ-2000, IS@ITC. Псков: ППИ, 2000, с.257-262.
61. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1988. -136 с.
62. Ершов Г.А., Солодовников А.С., Ермакович Ю.Л., Соболев А.Н., Блинова Л.Д. Методологические и программные разработки по вероятностному анализу безопасности и риска для радиационных объектов. Санкт-Петербургский институт "Атомэнергопроект" // VIII Международная конференция "Безопасность ядерных технологий", 26-30 сентября 2005 г. Санкт-Петербург, Россия.
63. Ковалевич О.М., Уголева И.Р., Попыкин А.И., Рубцов В.С., Зарицкий С.М. Состояние работ по аттестации программных средств, применяемых при

- обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Динамика и безопасность ядерных энергетических установок. М.: РНЦ КИ, 1999, с.148-157.
64. ГОСТ 27.002-89. НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ. Основные термины и определения. М.: ГКС СССР, 1989. -24 с.
 65. ГОСТ Р 51901 – 2002. УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ. Анализ риска технологических систем. М.: Госстандарт России. - 23 с.
 66. Reliability: A Practitioner's Guide. Relex Software, 2003.
 67. Ершов Г.А., Ермакович Ю.Л., Легошин П.В., Парфентьев М.А., Фролов А.С. Программный комплекс для вероятностного анализа безопасности атомных энергетических установок. // Труды Международной Научной Школы "Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах" (МА БР – 2006). СПб.: Издательство ГОУ ВПО "СПбГУАП", СПб., 2006, с.126-132.
 68. Задание. Описания исходных данных и результатов решения контрольных примеров Секции №5 Совета по аттестации ПС. СПб, 2006, -201 с.
 69. 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.
 70. Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Version 7.0 (saphire.inel.gov). Reference Manual.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ ТЕСТОВ ПРОГРАММНО-ГО СРЕДСТВА "Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем" (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0). СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2006.-177с.
2. ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЙ КОНТРОЛЬНЫХ ПРИМЕРОВ "Моделирование и анализ систем безопасности и ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности". СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2006. -157 с.
3. ИНСТРУКЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ (ПК АСМ СЗМА, версия 1.0, базовый образец). СПб.: ОАО "СПИК СЗМА", 2006. - 44 с.
4. 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"). СПб.: СПБ АЭП, ИПУ РАН, ОАО "СПИК СЗМА", 2005, 286 с.
5. ЗАДАНИЕ на решение Контрольных примеров "Моделирование и анализ систем безопасности и ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности" (файл fault_trees.doc). Нижний Новгород: ОКБМ им. И.И.Африкантова, 2005, -201 с.