Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)

На правах рукописи

Можаева Ирина Александровна

МЕТОДИКИ СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С СЕТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

Специальность 05.13.01 – "Системный анализ, управление и обработка информации"

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Мусаев Александр Азерович

Санкт-Петербург – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ **6**

Положения, выносимые на защиту **16**

1 Анализ методов и программных средств структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой **17**

1.1 Сравнительный анализ существующих методов и программных средств структурно-логического моделирования сложных систем 17

1.1.1 Основные особенности сложных систем с сетевой структурой, как объектов детерминированного моделирования и расчета показателей *17*

1.1.2 Общая характеристика существующих методов и технологий вероятностного моделирования устойчивости структурно-сложных систем *19*

1.1.3 Возможности и ограничения метода деревьев отказов *23*

1.1.4 Возможности и ограничения метода блок-схем работоспособности *28*

1.1.5 Возможности и ограничения общего логико-вероятностного метода *33*

1.1.6 Выводы по результатам сравнительного анализа *38*

1.2 Постановка задачи структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой 41

1.3 Анализ возможных путей формализации и решения поставленной задачи структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой 43

1.3.1 Задача разработки сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования последовательностей событий *44*

1.3.2 Задача разработки методик структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности сетевых планов и потоковых сетей *45*

1.3.3 Задача разработки методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы *47*

1.3.4 Практическая реализация разработанных методов и методик *48*

Выводы по главе 1 ..... **48**

2 Разработка сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования последовательностей событий в моделях функционирования сложных систем с сетевой структурой **50**

2.1 Представление с помощью схем функциональной целостности и логических функций детерминированных моделей функционирования систем 50

2.1.1 Правила представления с помощью СФЦ графов систем с сетевой структурой *51*

2.1.2 Правила записи сетевых функций алгебры логики *54*

2.2 Разработка основной процедуры СГМ для определения сетевых функций алгебры логики. 61
2.2.1 Основная процедура сетевого графоаналитического метода *61*
2.2.2 Методика применения СГМ последовательностей событий *69*
2.3 Алгоритм и программная реализация сетевого графоаналитического метода последовательностей событий 77
Выводы по главе 2 80
3 Разработка методик структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой 81
3.1 Разработка методики структурно-логического моделирования и расчета показателей сетевых планов выполнения работ 81
3.1.1 Правила представления сетевых графиков работ с помощью СФЦ *82*
3.1.2 Построение аналитических моделей сетевых планов работ *87*
3.1.3 Расчет показателей сетевых планов работ *89*
3.2 Разработка методики структурно-логического моделирования и расчета показателей потоковых сетей 101
3.2.1 Моделирование и расчет максимального потока в сети *102*
3.2.2 Моделирование и расчет рабочего потока в сети *105*
3.3 Разработка методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы 109
3.3.1 Задание исходных данных для реализации методики СЛМ ИСС *110*
3.3.2 Разработка основных этапов методики СЛМ ИСС с помощью численного решения систем логических уравнений *112*
3.4 Разработка правил учета последствий изменений состояний в аналитических моделях и системных показателях 116
3.5 Разработка алгоритма и программной реализации методики СЛМ ИСС 119
Выводы по главе 3 123
4 Программные средства, особенности проектирования, реализации и верификации структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой 126
4.1 Общие сведения о программных разработках 126
4.2 История разработки комплекса 126
4.3 Программное средство "ПК АСМ ЛВДМ" 128
4.3.1 Назначение программного комплекса "ПК АСМ ЛВДМ" *128*
4.3.2 Основные этапы работы программного комплекса *129*
4.4 Реализация "ПК АСМ ЛВДМ" 130
4.4.1 Графический интерфейс "ПК АСМ ЛВДМ" *130*

4.4.2 Структуры данных в "ПК АСМ ЛВДМ" *131*

4.4.3 Основные окна "ПК АСМ ЛВДМ" *133*

4.4.4 Основные результаты моделирования и расчетов детерминированных показателей результативности сложных систем *135*

4.4.5 Основные результаты моделирования и расчетов вероятностных показателей устойчивости систем *137*

4.5 Примеры использования программного комплекса "ПК АСМ ЛВДМ" 138

4.5.1 Использование "ПК АСМ ЛВДМ" для расчета сетевых планов работ *138*

4.5.2 Использование "ПК АСМ ЛВДМ" для учета последствий изменений состояний системы *141*

4.5.3 Использование "ПК АСМ ЛВДМ" для совместного вероятностного и детерминированного анализа систем *147*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ **151**

ЛИТЕРАТУРА **154**

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ..... **162**

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ..... **169**

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 ..... **170**

Сокращения

АСМ	–	**Автоматизированное Структурно-логическое Моделирование**
БС	–	**Блок Схема** (работоспособности)
ВФ	–	**Вероятностная Функция** (многочлен)
ГВС	–	**Главная Водонапорная Станция**
ДНФ	–	**Дизъюнктивная Нормальная Форма** логической функции
ДО	–	**Дерево Отказов**
ДП	–	**Детерминированная последовательность** событий
ДС	–	**Дерево Событий**
ДР	–	**Дерево Решений** систем логических уравнений СГМ
КПУФ	–	**Кратчайшие Пути Успешного Функционирования**
ЛВМ	–	**Логико-Вероятностный Метод**
СЛМ	–	**Структурно-Логическое Моделирование**
СЛМ ИСС	–	Методика **Структурно-Логического Моделирования** последствий **Изменений Состояний Системы**
СЛМ РП	–	Методики **Структурно-Логического Моделирования** и **Расчета Показателей** результативности сетевых систем
ЛКФ	–	**Логический критерий функционирования**
МДНФ	–	**Минимальная Дизъюнктивная Нормальная Форма** логической функции
МСО	–	**Минимальные Сечения Отказов**
ОЛВМ	–	**Общий Логико-Вероятностный Метод**
ЛВДМ	–	**Логико-вероятностные и детерминированные методы**
ПС	–	**Потоковая Сеть**
СГ	–	**Сетевой График**
СГМ	–	**Сетевой Графоаналитический Метод** определения детерминированных последовательностей событий при решении систем логических уравнений сетевой СФЦ
СЛУ	–	**Система Логических Уравнений**
СП	–	**Сетевой План**
СПУ	–	**Сетевое Планирование и Управление**
СС	–	**Сложные системы с сетевой структурой**
ССС	–	**Структурно-Сложная Система**. Под структурно-сложной системой принято понимать системы, которые при математическом описании не сводятся к последовательным, параллельным или древовидным структурам.
СФЦ	–	**Схема Функциональной Целостности**
СДНФ	–	**Совершенная Дизъюнктивная Нормальная Форма** логической функции
ФАЛ	–	**Функция Алгебры Логики**
$ФО_Б$	–	**Функция Обеспечения**
$ФО_Т$	–	**Функциональный Отказ**
ФРС	–	**Функция Работоспособности Системы** – ФАЛ, построенная на основе СФЦ и ЛКФ, представляющая условия выполнения системой своего функционального назначения.
ЭРМ	–	**Элементная Расчетная Матрица**

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап промышленного развития характеризуется расширением областей применения сложных систем с сетевой структурой (СС). Эффективный вероятностный и детерминированный структурный анализ (моделирование и расчет показателей) СС необходим для повышения качества подготовки и обоснования проектных и эксплуатационных управленческих решений.

Выполненные в диссертации исследования существующих научных школ, методов и программно-алгоритмических средств структурного анализа систем позволил осуществить их обобщенную классификацию по видам используемых структурных схем и вычисляемым показателям:

1 Школа Марковского вероятностного анализа на основе **графов переходов состояний** [36], широко применяются во всем мире.

2 Школа вероятностного анализа на основе **деревьев отказов** [16, 39, 40] (Х.А. Уотсон; Дж.Хенли, Х.Кумамото; Р.Т. Исламов, комплекс "РИСК"; А.М. Бахметьев, комплексы CRISS 4.0 и CRISS 5.1).

3 Школа монотонного логико-вероятностного анализа на основе **блок-схем работоспособности** [1, 5, 6, 25, 59] (И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов).

4 Школа общего логико-вероятностного анализа на основе **схем функциональной целостности** [7, 9, 15, 22, 66, 68] (А.С. Можаев, комплекс "АБИТР").

5 Школа детерминированного анализа на основе **сетевых планов работ** [28-30] (И.М. Сыроежин, И.М. Глазман, В.Г. Новиков).

6 Школа детерминированного анализа на основе **потоковых сетей** [52] (П.В. Наливайко).

Однако существующие в настоящее время методы и программные средства структурного анализа СС во многом являются разрозненными, а их результаты – трудно сопоставимыми. Такое состояние вопроса объясняется отсутствием единой теоретической, методической и программной базы решения вероятностных и детерминированных задач анализа СС. Например,

существующие методы и программные средства вероятностного (Risk Spectrum, Windchill, Cris, Арбитр и др.) и детерминированного (RastrWin, СПУ2, GraphMaker, ProjectManager и др.) структурного анализа основываются на разных способах и формах исходной постановки задач и не позволяют выполнять унифицированное (совместное) моделирование и расчет вероятностных (надежность, безопасность) и детерминированных (результативность) показателей сложных систем с сетевой структурой. Однако их совместное использование часто бывает принципиально необходимым, например, при решении задач, связанных с испытанием блоков с радиоактивными материалами, потребуется применение как методов сетевого планирования и управления, так и методов оценки вероятности возникновения аварий. И для решения этих задач необходимо применить различные методы и программные средства анализа сложных систем с дальнейшим сопоставлением полученных разрозненных результатов. Поэтому, все более актуальной становится решение новых научных и практических **задач** совершенствования существующих и разработки новых методов, методик, а также математического и алгоритмического совместного (объединенного, комплексного) моделирования и расчета детерминированных показателей результативности и вероятностных показателей устойчивости функционирования сложных систем с сетевой структурой различных видов, классов и назначения.

Одним из рациональных **путей решения** данных задач является обоснованный выбор одного из существующих методов автоматизированного вероятностного моделирования структурно-сложных систем в качестве методической базы и осуществление его целенаправленного развития до уровня, обеспечивающего возможность комплексного (совместного) решения детерминированных и вероятностных задач анализа (моделирования и расчета показателей) различных свойств структурно-сложных и высокоразмерных систем с сетевой структурой.

В настоящее время в отечественной науке и за рубежом получены высокие научные и практические результаты разработки так называемых логико-вероятностных методов (ЛВМ) [5-9, 15-17, 22, 25, 42, 51] и создания

соответствующих программных средств автоматизированного структурно-логического анализа надежности (безотказности), живучести и безопасности сложных системных объектов и процессов [18-20, 23, 37-51, 54]. Исследования этих методов показали [9, 42, 48], что все они ориентированы только на вероятностный анализ структурных свойств устойчивости (надежности, живучести и безопасности) различных системных объектов на стадии их проектирования. Однако существует объективная взаимосвязь детерминированных и вероятностных составляющих структурно-логического анализа различных системных объектов и процессов. При разработке и использовании только детерминированных методов анализа результативности систем обычно принимается допущение об абсолютной устойчивости (безотказности) всех элементов. При вероятностном анализе структурной устойчивости (надежности, живучести, безопасности) постановка задачи осуществляется на основе схем работоспособности или отказа систем, т.е. на основе их исходных детерминированных моделей.

В диссертации рассмотрена одна из возможностей реализации унифицированного анализа – методология развития существующих логико-вероятностных методов на новый класс задач так называемого детерминированного (не вероятностного) анализа СС на основе расширения общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) [7-9, 15, 18-23, 26, 42, 43, 46, 48, 50, 51, 54, 66, 68], реализованная в соответствующем программном обеспечении.

Актуальность темы исследования (методики структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой) обусловлена следующими основными положениями:

1 Постоянно возрастающими потребностями практики в научном обосновании путей увеличения результативности функционирования разрабатываемых и эксплуатируемых сложных системных объектов различного назначения.

2 Структурной сложностью и большой размерностью современных организационных и технических сложных систем и, как следствие,

невозможностью применения ручных методик построения математических моделей, оценки свойств результативности и надежности их функционирования.

3 Необходимостью обеспечения научными методами моделирования и расчета показателей результативности сложных систем с сетевой структурой не только на этапе их исследования и проектирования, но и в процессе практического применения (эксплуатации).

В рамках данной работы рассматривается структурно-логическое моделирование двух классов сложных систем с сетевой структурой – сетевых планов работ [28-30] и потоковых сетей [31-35], детерминированные показатели которых существующими ЛВМ не определяются.

Первое из указанных положений предполагает расширение области практического применения научных методов анализа результативности функционирования СС в научных, проектных организациях и на промышленных предприятиях.

Второе положение приводит к тому, что создаваемые методы структурно-логического моделирования и расчета показателей должны доводиться до алгоритмического уровня разработки, обеспечивающего возможность программной реализации как процессов построения математических моделей исследуемых свойств СС, так и процессов расчета соответствующих показателей.

Третье положение требует научной и практической реализации подхода к анализу сложных систем с сетевой структурой, обеспечивающему:

- мониторинг функционирования систем в реальном масштабе времени их эксплуатации;

- корректный учет в детерминированных и вероятностных моделях и показателях результативности и надежности сложных систем достоверных изменений их текущих состояний вследствие, например, отказов или отключений элементов, изменений режимов работы, возникновения аварийных ситуаций в процессе эксплуатации.

В целях реализации указанных положений в качестве **главной научной задачи диссертации** определена ***разработка нового методического аппарата***

(метода, методик, процедур, а также математического и алгоритмического обеспечения) структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой.

Главной практической задачей диссертации является создание экспериментального образца унифицированного программно-алгоритмического комплекса (ПАК) автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами ("ПК АСМ ЛВДМ").

Важной **дополнительной задачей** является сохранение в разрабатываемом методическом аппарате ранее реализованных в ОЛВМ и программных комплексах автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ) [18-20] возможностей вероятностного анализа устойчивости структурно-сложных и высокоразмерных системных объектов и процессов.

Главная научная и главная практическая задачи диссертации включают в себя следующие **частные научные и практические задачи**:

1 Обоснование выбора общего логико-вероятностного метода и технологии автоматизированного структурно-логического моделирования в качестве исходной теоретической базы решения главной научной задачи диссертации.

2 Разработка сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования последовательностей событий в формируемых моделях функционирования сложных систем с сетевой структурой.

3 Разработка методик и процедур структурно-логического моделирования и расчета типовых показателей результативности функционирования двух видов сложных систем с сетевой структурой – сетевых планов работ и потоковых сетей с учетом изменений их состояний.

4 Разработка экспериментального образца программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами "ПК АСМ ЛВДМ".

Цель работы – разработка метода, методик, а также математического и алгоритмического обеспечения структурно-логического моделирования и расчета

показателей результативности сложных систем с сетевой структурой для повышения оперативности и обоснованности их применения на различных этапах жизненного цикла.

Объектом исследования являются сложные системы с сетевой структурой.

Предметом исследования выступают математические методы, методики, процедуры и программные средства анализа (моделирования и расчета показателей) результативности и надежности функционирования сложных систем с сетевой структурой.

Методы исследования. При проведении исследований использовались следующие научные теории и методы: общий логико-вероятностный метод, теории автоматизированного структурно-логического моделирования, сетевого планирования, потоковых сетей, алгебра логики, теория вероятностей, теория надежности.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена правильным применением используемых теорий и методов исследования и подтверждена:

- совпадением результатов моделирования и расчетов тестовых задач с результатами, полученными другими методами и средствами;
- решением контрольных задач автоматизированного моделирования по ключевым точкам, в которых результаты заранее известны;
- непротиворечивостью результатов моделирования и расчетов физическому смыслу свойств исследуемых системных объектов.

Научная новизна. На основе развития ОЛВМ впервые разработаны:

1 Научные и методические положения нового сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования последовательностей событий, отличающегося от существующего универсального графоаналитического метода возможностью учета последовательностей событий при построении результирующих моделей функционирования сложных систем с сетевой структурой.

2 Методики структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности функционирования СС с учетом последствий изменений их состояний, отличающиеся возможностью оперативного учета изменения текущих

состояний элементов систем и оценки последствий этих изменений.

3 Экспериментальный образец унифицированного программного комплекса, позволяющий выполнять структурно-логическое моделирование и расчет показателей результативности двух видов сложных систем с сетевой структурой – сетевых планов работ и потоковых сетей.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в следующем:

1 Разработанные метод, методики, процедуры, а также математическое и алгоритмическое обеспечение расширяют область практического применения ОЛВМ на новый для него класс задач детерминированного анализа сложных систем с сетевой структурой. При этом в полном объеме сохраняются существующие возможности ОЛВМ построения моделей и расчета вероятностных показателей различных сложных системных объектов и процессов.

2 Созданный унифицированный программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами может применяться не только на этапе проектирования сложных систем с сетевой структурой, но и на этапе мониторинга процессов их эксплуатации.

Основные результаты диссертационного исследования **реализованы**:

– В промышленном образце Программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем "АРБИТР" (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0), разработанного в ОАО "СПИК СЗМА" и аттестованного Ростехнадзором РФ // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611101. М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003. – 1с. // Аттестационный паспорт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) РФ, №222 от 21 февраля 2007 г. – 6 с., [18]. Акт о внедрении научных результатов Гладковой И.А в комплекс "АРБИТР".

– В Программном комплексе автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). Свидетельство об официальной

регистрации № 2003611099. М.: РОСПАТЕНТ РФ, 12 мая 2003 г., [19].

– В Библиотеке программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ&ВФ). Свидетельство об официальной регистрации № 2003611100. М.: РОСПАТЕНТ РФ, 12 мая 2003 г., [20]. Внедрен в программный комплекс "АРБИТР", аттестованный Ростехнадзором РФ.

– В Программном комплексе автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем 2001, демоверсия ("ПК АСМ 2001 Демо", автор Гладкова И.А.). Приложение к монографии: Поленин В.И., Рябинин И.А., Свирин С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства. Санкт-Петербургское региональное отделение РАЕН, 2010, [23].

– В Программном комплексе автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами "ПК АСМ ЛВДМ". Акт о реализации научных результатов диссертационных исследований в ООО "НТЦ "ТБ".

Апробация работы осуществлена на девяти научно-практических конференциях:

1 Доклад на Международной научной школе "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах (МА БР – 2010), СПб., 2010 г. [45].

2 Доклад на XIII Всероссийской научно-практической конференции "Актуальные проблемы защиты и безопасности" Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Секция Ленинградского областного регионального отделения Общероссийской общественной организации "Российское научное общество анализа риска", СПб., 5-8 апреля 2010 г. [43].

3 Доклад на Международном конгрессе "Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов". Секция "Инфокоммуникации в решении задач тысячелетия", СПб., 12-13 ноября 2010 г. [46].

4 Доклад на Международной научной школе "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах" (МА БР – 2011), СПб., 28 июня-02 июля 2011 г. [56].

5 Доклад на XVI Всероссийской научно-практической конференции "Актуальные проблемы защиты и безопасности" Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Секция Ленинградского областного регионального отделения Общероссийской общественной организации "Российское научное общество анализа риска", СПб., 3-6 апреля 2013 г. [60].

6 Доклад на второй международной научно-практической конференции "Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем – ИКМ МТМТС 2013", проводимой в рамках Международного Военно-Морского Салона МВМС-2013, СПб., 3-4 июля 2013 г. [61].

7 Доклад на конференции "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2014) в рамках 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления (РМКПУ-2014), СПб., 7-9 октября 2014 г. [63].

8 Доклад на двенадцатой международной научной школе "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах" (МА БР – 2014), СПб., 18-20 ноября 2014 г. [64].

9 Доклад на XIII Всероссийской научно-практической конференции "Актуальные проблемы защиты и информации", СПб, 3 апреля 2015 г.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в пятнадцати печатных работах: двух монографиях, восьми трудах научных конференций и пяти статьях, из которых семь работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ [42, 43, 44, 49, 56, 60, 62].

Личный вклад автора в основных публикация с соавторами состоит в следующем: в публикациях [9,42,56,62] изложены основы ОЛВМ и результаты реализации метода автоматического построения монотонных логических функций работоспособности систем, используемые в программных комплексах АСМ в виде библиотеки программных модулей ЛОГ&ВФ [20]; в [43,44,61,64] представлена разработанная методика СЛМ учета последствий изменений состояний и реализа-

ция ее в программном комплексе "АРБИТР"; в [45,46] – детерминированные разделы ОЛВМ и основы разработанной методики СЛМ и расчета показателей сетевых планов работ; в [49,55,60,63,68] изложены выносимые на защиту СГМ и три методики СЛМ и расчета показателей результативности сложных систем с сетевой структурой с учетом последствий изменений их состояний; в [68] представлено описание программных комплексов "АРБИТР" и "ПК АСМ 2001", в которых реализованы выносимые на защиту метод и методики.

Объем диссертации составляет 153 страницы основного текста, в том числе 35 рисунков, 22 таблицы и 9 примеров решения задач. Библиография содержит 68 наименований.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены научные и практические задачи диссертации, сформулированы цель, научная новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен сравнительный анализ существующих методов и программных и алгоритмических средств вероятностного и детерминированного моделирования и осуществлена формализованная постановка задачи разработки ***нового методического аппарата (метода, методик, процедур, а также математического и алгоритмического обеспечения) структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой*** на основе дальнейшего развития общего логико-вероятностного метода, а также создание соответствующего унифицированного программного обеспечения.

Во второй главе представлен разработанный **сетевой графоаналитический метод структурно-логического моделирования последовательностей событий**. Метод включает:

1 Правила структурного представления последовательностей событий в графах сетевых схем функциональной целостности (сетевых СФЦ) моделируемых систем.

2 Способы аналитического представления последовательностей событий в

сетевых функциях алгебры логики (сетевых ФАЛ).

3 Процедуру решения систем логических уравнений, представляющих сетевые СФЦ, и построения детерминированных математических моделей функционирования исследуемых систем в форме сетевых ФАЛ.

В третьей главе представлены результаты разработки трех методик структурно-логического моделирования и расчета типовых показателей сетевых планов работ, потоковых сетей и учета последствий изменений состояний системы.

В четвертой главе представлен разработанный в рамках диссертационного исследования экспериментальный образец программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами "ПК АСМ ЛВДМ".

Положения, выносимые на защиту

I Сетевой графоаналитический метод структурно-логического моделирования последовательностей событий, включающий в себя:

– правила представления графов сложных систем с сетевой структурой с помощью графического аппарата сетевых схем функциональной целостности и аналитического аппарата записи соответствующих систем логических уравнений;

– правила записи сетевых функций алгебры логики, позволяющие учесть последовательности элементарных событий сложных систем;

– процедуру решения систем логических уравнений, представляющих сетевые СФЦ, позволяющую определять сетевые функции алгебры логики.

II Методики структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности сложных систем с сетевой структурой с учетом последствий изменений их состояний.

III Экспериментальный образец программно-алгоритмического комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами "ПК АСМ ЛВДМ".

1 Анализ методов и программных средств структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой

1.1 Сравнительный анализ существующих методов и программных средств структурно-логического моделирования сложных систем

1.1.1 Основные особенности сложных систем с сетевой структурой, как объектов детерминированного моделирования и расчета показателей

В диссертации выполнены исследования и разработка метода структурно-логического моделирования и методик расчета показателей **сложных систем с сетевой структурой**, в которых:

– результативность функционирования достигается путем выполнения элементами своих функций (работ, событий, преобразований и т.п.) в строго определенной, детерминированной последовательности;

– условия реализации функций элементами и подсистемами представляются устойчивыми последовательными, параллельными и/или циклическими (мостиковыми) причинно-следственными связями;

– в последовательно-параллельной и циклической структуре сети содержится достаточно информации для построения математических моделей и выполнения на их основе расчетов детерминированных показателей результативности функционирования (уровня реализации требуемых функций) системы.

Указанным положениям соответствует широкий класс структурно-сложных сетевых системных объектов и процессов, например:

– все виды организационных систем, процессы функционирования которых представляются сетевыми планами PERT или GERT [28-30];

– электрические системы и сети, в которых показателями результативности функционирования выступают распределения потоков передачи генерируемой мощности к потребителям [31-33];

– системы водоснабжения и водоотведения, в которых важными показателями результативности функционирования выступают распределения напоров воды, передаваемой потребителям [21, 34, 35].

Выбор базового метода решения главной научной задачи диссертации осуществлен на основе сравнительного анализа комплекса существующих отечественных и зарубежных **логико-вероятностных методов** и программных средств моделирования и расчета вероятностных показателей надежности и безопасности структурно-сложных систем [42, 48]. При выборе базового метода анализировались как существующие возможности решения различными методами задач вероятностного анализа устойчивости, так и потенциальные возможности их развития и адаптации к решению нового для них класса задач детерминированного моделирования и расчета показателей результативности функционирования сложных системных объектов и процессов с сетевой структурой.

Выполненные исследования показали, что наиболее полная и всесторонняя классификация математических моделей приведена в работе [67]. Применительно к данному диссертационному исследованию в приведенной классификации можно выделить следующую группу: детерминированные, недетерминированные (с неопределенностью) и гибридные математические модели. В качестве детерминированных в диссертации рассматриваются модели сложных систем с сетевой структурой, недетерминированных – логико-вероятностные модели, а гибридными являются модели сложных систем с сетевой структурой и заданными для всех элементов детерминированными параметрами результативности и вероятностными параметрами надежности (выполнения работ, свершения событий, безотказной работы элементов сети и т.д.).

1.1.2 Общая характеристика существующих методов и технологий вероятностного моделирования устойчивости структурно-сложных систем

Существующие методы вероятностного моделирования и расчета показателей устойчивости (надежности, живучести и безопасности) структурно-сложных систем [1, 3-17, 22, 25, 26, 33-36, 48, 51, 57-59, 64, 66, 68] можно разделить на два больших подкласса:

1 Методы моделирования, основанные на структурных схемах исследуемых свойств, в которых элементами (вершинами) являются несовместные **состояния системы** в целом, а ребрами представляются направления и интенсивности переходов между этими состояниями (графы переходов состояний). Этот подкласс называют методами Марковского моделирования [36].

2 Методы моделирования, основанные на структурных схемах исследуемых свойств систем, в которых элементами (вершинами) являются **состояния отдельных элементов**, а ребрами представляются логические условия реализации или не реализации элементами их функций в системе. Этот подкласс характеризуется большим количеством относительно самостоятельных методов моделирования, наименования которых часто связывают с видом используемых структурных схем, например, блок-схемами (структурными схемами) [16, 25], деревьями неисправностей (отказов) [3, 16], деревьями событий [3, 14], схемами функциональной целостности [7-9, 66, 68] и др.

В области решения задач вероятностного структурного моделирования наивысший уровень универсальности имеют Марковские методы системного анализа. Но развитие этого класса методов для решения задач детерминированного моделирования сложных систем с сетевой структурой ограничивается следующими положениями:

– с помощью графа переходов состояний Марковских вероятностных моделей сложно представить детерминированные процессы обеспечения результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой, которые обычно основываются на структурах типа блок-схем с

последовательными, параллельными и циклическими (мостиковыми) соединениями элементов;

– графы переходов состояний Марковских моделей характеризуются большой размерностью, что затрудняет, а часто делает невозможным, их практическое применение в анализе реальных системных объектов и процессов.

Второй подкласс методов вероятностного системного моделирования, основанный на структурных схемах исследуемых свойств устойчивости, в большей степени пригоден для их развития в целях разработки и реализации методик детерминированного моделирования и расчетов показателей результативности. Это подтверждается тем, что расчеты показателей результативности сложных систем с сетевой структурой обычно осуществляются на основе структурных схем последовательного, параллельного и циклического соединения элементов [28, 31, 35]. Вместе с тем, данный класс методов характеризуется большим разнообразием подходов, способов реализации и уровней автоматизации процессов моделирования и расчетов различных показателей. Поэтому для обоснованного выбора из них базового метода, наиболее пригодного для адаптации к детерминированным задачам структурного анализа, было выполнено сравнение следующих трех, наиболее широко используемых на практике, отечественных и зарубежных ЛВМ [9, с. 78]:

– методов и программных средств, использующих в качестве исходных структурных схем деревья неисправностей (отказов) и деревья событий [3, 16, 17, 37-40, 49];

– методов и программных средств, использующих в качестве исходных структурных схем блок-схемы работоспособности [5, 6, 17, 25, 41, 48];

– методов и программных средств, использующих для структурного описания исследуемых свойств систем новый графический аппарат – схемы функциональной целостности [7-9, 15, 18-23, 48, 66, 68].

Все отечественные и зарубежные методы указанных трех классов, явно или неявно, используют в качестве базового аппарат алгебры логики для исходной структурной постановки задач и первичного математического моделирования. То

есть по существу, все они являются различными видами **логико-вероятностных методов** [9, с. 78].

Процесс обоснования выбора базового метода далее иллюстрируется одним общим примером анализа надежности (безотказности) фрагмента электрической системы, описанной в работе [33, с.71]. Исходная структурная схема этой системы изображена на рисунке 1.1. Числами 2, 3, 4, 5 и 6 на схеме пронумерованы узловые шины, посредством которых реализуются связи генерирующих, нагрузочных и транзитных элементов электрической сети.

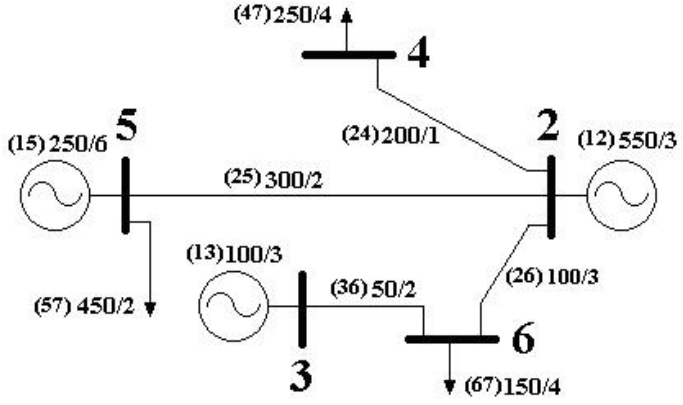


Рисунок 1.1 – Схема электрической системы

В системе выделено десять элементов, двузначные номера ***i*** которых, указанные в круглых скобках в начале записей, составлены из номеров узловых шин, представленных на рисунке 1.1. В этих записях числа, следующие за скобками, определяют заданные нормативные значения параметров wn_i генерируемого, передаваемого или потребляемого потока мощности соответствующими элементами ***i*** электрической системы. За наклонной чертой записей указаны параметры z_i сопротивления (протяженности или стоимости) [33, с.73] элементов рассматриваемой электрической сети.

Для моделирования и расчета детерминированных показателей потоков мощности данной электрической системы в работе [33, с.71] используется сетевой последовательно-параллельный граф, изображенный на рисунке 1.2.

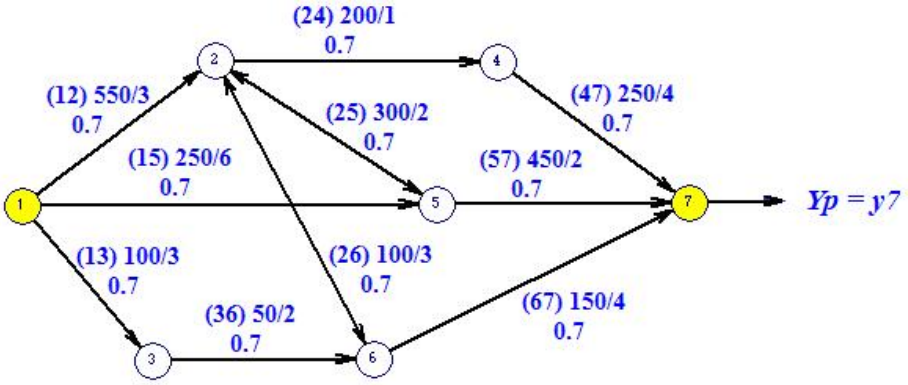


Рисунок 1.2 – Граф (функциональная схема) электрической сети

Вершинами 2, 3, …, 6 на графе обозначены узловые шины (см. рисунок 1.1). Дополнительно в функциональную схему введены два узла с номерами: ***i*=1** – эквивалентный генератор (исток), ***i*=7** – эквивалентная нагрузка (сток) [33, с.71].

На рисунке 1.2 с помощью десяти направленных ребер (дуг) представлены элементы данной электрической системы (см. рисунок 1.1). При этом цифры двузначных номеров ***i*** ребер/элементов, указанные на рисунках 1.1 и 1.2 записью в круглых скобках, совпадают с номерами узловых шин, между которыми расположены (которые соединяют) соответствующие элементы электросети. Стрелками на ребрах графа электросети на рисунке 1.2 определены возможные направления передачи мощности от генерирующих элементов (12, 15 и 13) к потребителям электроэнергии (47, 57 и 67). Дуги 25 и 26 заданного на рисунке 1.2 графа являются двунаправленными, что говорит о наличии циклических (мостиковых) связей в рассматриваемой электрической сети. В записях на рисунке 1.2 представлены следующие заданные параметры элементов сети

$$\frac{(\textbf{номер элемента} - i)\ \textbf{поток}, \textbf{мощность} - wn_i / \textbf{сопротивление} - z_i}{\textbf{вероятность безотказной работы} - p_i}. \qquad (1.1)$$

В [33] числовые значения вероятностей безотказной работы (или готовности) элементов указаны не были. Поэтому в данном тестовом примере (в целях сравнительного анализа разных ЛВМ) вероятности безотказной работы всех элементов приняты одинаковыми и равными

$$p_i = 0.7,\ i = 12, 13, 15, 24, 25, 26, 36, 47, 57, 67. \qquad (1.2)$$

В целях сравнения различных классов ЛВМ и обоснования выбора из них базового метода для разработки новых методов и методик структурно-

логического моделирования и расчета показателей сложных систем с сетевой структурой, в качестве первой общей задачи выбрано моделирование и расчет вероятности безотказной работы электрической системы (см. рисунки 1.1 и 1.2) по критерию $\boldsymbol{Yp}\ Z\ \boldsymbol{y_7}$ – обеспечение питанием (полностью или частично) хотя бы одного из трех потребителей 47, 57 и 67, объединенных в узле стока 7 эквивалентной нагрузки (см. рисунок 1.2).

1.1.3 Возможности и ограничения метода деревьев отказов

Для ручного или машинного решения задач вероятностного моделирования логико-вероятностным методом деревьев отказов (неисправностей) [3, 16, 17, 37-40, 48] необходимо, на основе исходных функциональных схем (см. пример на рисунках 1.1 и 1.2) и описаний условий работоспособности системы, построить граф дерева отказов (ДО). В рассматриваемом примере разрабатываемое ДО должно представлять все возможные логические условия не обеспечения питанием (ни полностью, ни частично) или собственных отказов всех трех потребителей 47, 57 и 67. Построение ДО осуществляется путем умозрительного перебора всех возможных различных вариантов комбинаций отказов элементов (в примере десяти ребер сети на рисунке 1.2), приводящих к отказу системы в целом. Вариант такого правильного ДО рассматриваемого примера электрической сети (см. рисунки 1.1 и 1.2) приведен на рисунке 1.3.

На рисунке 1.3 выход $\boldsymbol{Yo}$ обозначает вершинное событие ДО, которое соответствует условию не реализации заданного на рисунке 1.2 критерия $\boldsymbol{y_7}$ – обеспечения питанием (полностью или частично) хотя бы одного из трех потребителей 47, 57 или 67. При этом считается, что к отказу системы приводят и собственные отказы самих потребителей.

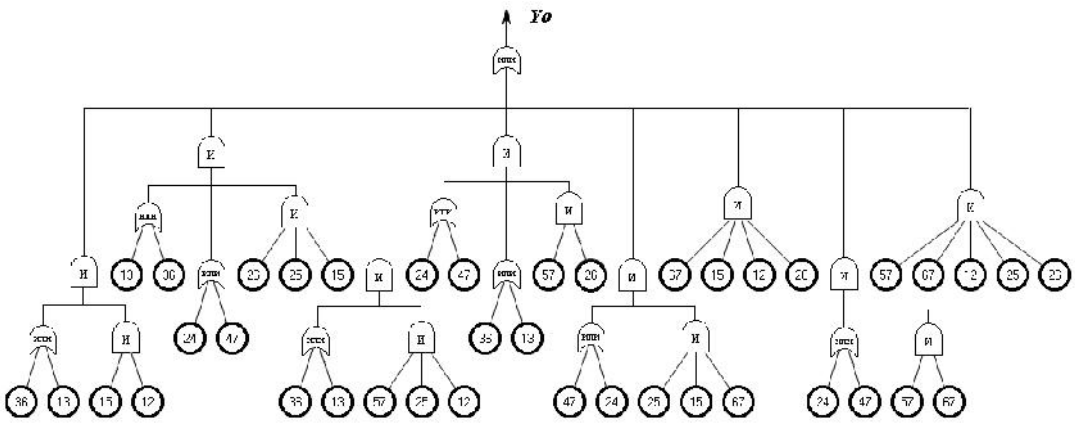


Рисунок 1.3 – Граф дерева отказов примера электрической сети

В схеме ДО на рисунке 1.3 все вершины ***i*** = 12, 13, …, 67 являются инициализирующими событиями отказов соответствующих элементов рассматриваемого примера электрической сети, представленных на рисунке 1.2 ребрами исходного графа функциональной схемы ее работоспособности. Пример показывает, что в общем случае построение ДО реальных систем большой размерности и высокой структурной сложности является трудоемким процессом постановки задачи вероятностного моделирования. Трудоемкость построения ДО обусловлена тем, что разработчик должен на основе знаний условий работоспособности системы умозрительно перебрать и графически представить все комбинации (не пропустив ни одной!) совместных отказов групп элементов, достоверно приводящих к отказу системы в целом, т.е. не реализации заданного критерия ее функционирования.

По форме представления в типовых графах ДО (см. рисунок 1.3) все вершины (события отказов элементов) и логические операторы "И" и "ИЛИ" могут иметь только одну исходящую дугу. Это приводит к необходимости использовать в графах ДО большого количества размноженных вершин (на рисунке 1.3 вершины с одинаковыми номерами), что приводит к существенному увеличению их размерности (на рисунке 1.3 десять элементов электрической сети представлены с помощью 38 вершин!).

Графы ДО могут использоваться как для ручного, так и для автоматизированного моделирования и расчета вероятностных показателей отказов систем с помощью известных отечественных и зарубежных программных

комплексов, реализующих данную технологию: Risk Spectrum [37], РИСК [39], CRISS 4.0 [40], SAPHIRE [38], Windchill FTA (Relex Fault Tree) [41] и АРБИТР [18].

На следующем этапе, на основе построенного графа ДО и вершинного события ***Yo*** (критерия отказа), определяется логическая функция, которая в *минимальной дизъюнктивной нормальной форме* (МДНФ) представляет все *минимальные сечения отказов* (МСО) исследуемой системы

$$\boldsymbol{Y_O} = \boldsymbol{C_1} \cup \boldsymbol{C_2} \cup \ldots \cup \boldsymbol{C_k} \cup \ldots \cup \boldsymbol{C_K} = \bigcup_{k=1}^{K} \boldsymbol{C_k} = \bigcup_{k=1}^{K} \left(\bigwedge_{i \in L_j} \boldsymbol{x''_i} \right). \qquad (1.3)$$

В выражении (1.3) используются следующие обозначения:

Yo – критерий отказа системы (вершинное событие ДО);

C_k – конъюнкция МСО;

k – номер конъюнкции МСО;

i – номер элемента системы (простой логической переменной);

x''_i – инверсия простой логической переменной, представляющая событие отказа элемента ***i*** системы;

$\&$ – операция конъюнкции в логической функции (логическое произведение);

$\vee$ – операция дизъюнкции в логической функции (логическое сложение);

k – порядковый номер конъюнкции в МСО логической функции;

K – число конъюнкций в логической функции.

В таблице 1.1 приведена развернутая логическая модель (1.3) отказа электрической системы рассматриваемого примера (см. рисунки 1.1 и 1.2), полученная на основе графа ДО, изображенного на рисунке 1.3.

В таблице 1.1 используются следующие обозначения:

k – номер конъюнкции логической функции отказа электрической системы;

C_k – конъюнкция логической функции отказа (сечение отказа);

x''_i – событие отказа элемента системы, представленного в графе ДО вершиной с номером ***i***;

$\vee$ – операция дизъюнкции между конъюнкциями логической функции (логическое сложение);

$\wedge$ – операция конъюнкции (логическое умножение).

Таблица 1.1 – Результаты моделирования МСО на основе ДО

№ k	*Минимальные сечения отказов C_k*	*№ k*	*Минимальные сечения отказов C_k*
1	2	3	4
1	$x''_{24} \vee x''_{57} \vee x''_{67}$	*10*	$\vee x''_{13} \wedge x''_{24} \wedge x''_{26} \wedge x''_{57} \vee$
2	$\vee x''_{12} \wedge x''_{15} \wedge x''_{36} \vee$	*11*	$\vee x''_{12} \wedge x''_{13} \wedge x''_{25} \wedge x''_{57} \vee$
3	$x''_{47} \vee x''_{57} \vee x''_{67}$	*12*	$\vee x''_{12} \wedge x''_{25} \wedge x''_{36} \wedge x''_{57} \vee$
4	$\vee x''_{12} \wedge x''_{15} \wedge x''_{13} \vee$	*13*	$\vee x''_{13} \wedge x''_{26} \wedge x''_{47} \wedge x''_{57} \vee$
5	$\vee x''_{12} \wedge x''_{15} \wedge x''_{26} \wedge x''_{67} \vee$	*14*	$\vee x''_{12} \wedge x''_{25} \wedge x''_{26} \wedge x''_{57} \wedge x''_{67} \vee$
6	$\vee x''_{15} \wedge x''_{25} \wedge x''_{47} \wedge x''_{67} \vee$	*15*	$\vee x''_{15} \wedge x''_{13} \wedge x''_{24} \wedge x''_{25} \wedge x''_{26} \vee$
7	$\vee x''_{15} \wedge x''_{24} \wedge x''_{25} \wedge x''_{67} \vee$	*16*	$\vee x''_{15} \wedge x''_{13} \wedge x''_{25} \wedge x''_{26} \wedge x''_{47} \vee$
8	$x''_{24} \vee x''_{26} \vee x''_{36} \vee x''_{57}$	*17*	$\vee x''_{15} \wedge x''_{25} \wedge x''_{26} \wedge x''_{36} \wedge x''_{47} \vee$
9	$\vee x''_{26} \wedge x''_{36} \wedge x''_{47} \wedge x''_{57} \vee$	*18*	$\vee x''_{15} \wedge x''_{24} \wedge x''_{25} \wedge x''_{26} \wedge x''_{36}$

В столбцах 2 и 4 таблицы 1.1 приведены конъюнкции МСО, полученные на основе ДО, изображенного на рисунке 1.3. В совокупности они образуют логическую функцию отказов (***Yo*** в МДНФ) рассматриваемого примера электрической сети.

Логические функции отказов метода ДО позволяют в компактной форме представить все Марковские состояния неработоспособности исследуемой системы, в которых (и только в которых) реализуется заданный критерий ***Yo*** ее отказа. Для рассматриваемого примера электрической сети, состоящей всего из 10 элементов (см. рисунки 1.1. и 1.2), логическая функция отказов, приведенная в таблице 1.1, представляет ровно **470** Марковских состояний неработоспособности (вычислено путем преобразования выражения логической функции отказов в совершенную дизъюнктивную нормальную форму). Столь высокая размерность делает практически невозможным применение методов Марковского моделирования даже для рассматриваемой малоразмерной электрической сети.

В методе ДО применение формируемых логических функций отказов в вероятностных моделях надежности основывается на том, что эти функции точно и однозначно представляют те сложные случайные события (отказа систем), вероятности которых требуется рассчитать. В теории ДО и в большинстве программных комплексов, реализующих эту технологию, применяется приближенный метод расчета вероятности реализации вершинного события ***Yo***

отказа системы, выполняемый на основе следующего выражения [40]

$$p(Yo) = Q_C \le 1 - \prod_{k=1}^{K} (1 - Q_{L\,k}) = 1 - \prod_{k=1}^{K} (1 - \prod_{i \in L\,k} q_i), \qquad (1.4)$$

где: $p(Yo) = Q_C$ – вероятность вершинного события ДО (отказа системы);

K – количество минимальных сечений $\boldsymbol{L_k}$ отказов (МСО);

q_i – вероятность отказа (неготовности) $\boldsymbol{i}$–го элемента системы;

$Q_{L\,k} = \prod_{i \in MCO\,k} q_i$ – вероятность реализации $\boldsymbol{k}$–го минимального сечения $\boldsymbol{C_k}$.

Вычисленная на основе (1.4) приближенная вероятность (верхняя оценка) отказа рассматриваемого примера электрической сети составляет

$$p(Yo) = Q_C \le 0.177038963321064, \qquad (1.5)$$

что на 40.89% превышает точное значение этого показателя (1.6)

$$p(Yo) = Q_C = 0.12565471\,14. \qquad (1.6)$$

Следует отметить, что логические модели в форме МСО играют важную роль и в детерминированном моделировании, и в расчете показателей результативности сетевых потоковых систем. Как отмечено в работе [33], сечения отказов могут использоваться для детерминированного моделирования и расчета максимально возможных потоков мощности в заданных структурах электрических сетей. Так, для рассматриваемого примера (см. рисунки 1.1 и 1.2) детерминированный анализ МСО, приведенный в таблице 1.1, позволил определить, что максимальный поток мощности в этой электрической сети составляет

$$S_m = 800\ MBm. \qquad (1.7)$$

Однако модели в форме ДО не позволяют выполнять детерминированные расчеты показателей распределения потоков мощности по ветвям и их сопротивлений (протяженности или стоимости) в электрических сетях.

Приведенные результаты анализа позволяют заключить, что основными ограничениями ЛВМ ДО и программных средств их реализации являются:

– высокая трудоемкость построения исходных структурных моделей исследуемых свойств устойчивости систем в форме деревьев отказов;

– возможность вычисления только приближенных значений вероятностных показателей;

– возможность использования в ЛВМ ДО только одного критерия – вершинного события дерева отказов, что ограничивает возможности решения задач многовариантного и многорежимного моделирования;

– все существующие технологи, основанные на ДО, осуществляют моделирование и расчеты показателей в предположении, что достоверным является единственное исходное состояние системы – все элементы работоспособны. Это ограничивает (практически не позволяет) использование ЛВМ ДО для мониторинга риска функционирования систем в процессе их эксплуатации;

– недоступность оценивания в технологии ДО ряда важных детерминированных показателей результативности систем с сетевой структурой, методы расчетов которых основаны на применении блок-схем работоспособности [31-33].

1.1.4 Возможности и ограничения метода блок-схем работоспособности

Для ручного или машинного решения вероятностных задач логико-вероятностным методом блок-схем (БС) работоспособности [5, 6, 17, 25, 41, 48] необходимо на основе функциональной схемы (см. рисунки 1.1 и 1.2), описания системы и заданного критерия функционирования построить последовательно-параллельную структурную модель ее безотказной работы. В ЛВМ БС построение структурной модели работоспособности системы (как и рассмотренное ранее построение ДО) является сугубо творческим процессом постановки задачи моделирования и расчетов. Однако трудоемкость построения правильной БС, как правило, значительно ниже трудоемкости построения правильного ДО. Это обусловлено, прежде всего, тем, что разработчик БС, как правило, хорошо знает условия работоспособности, т.е. выполнения системой своего функционального назначения (для этого система и разрабатывается). Кроме того, в построении

правильной БС существенную помощь может оказать рабочая документация проекта системы, в которой условия ее функционирования подробно описаны.

На рисунке 1.4 приведен вариант БС работоспособности рассматриваемой в примере системы. БС построена на основе исходной схемы электрической сети (рисунок 1.1), графа электрической сети (рисунок 1.2) и их описаний.

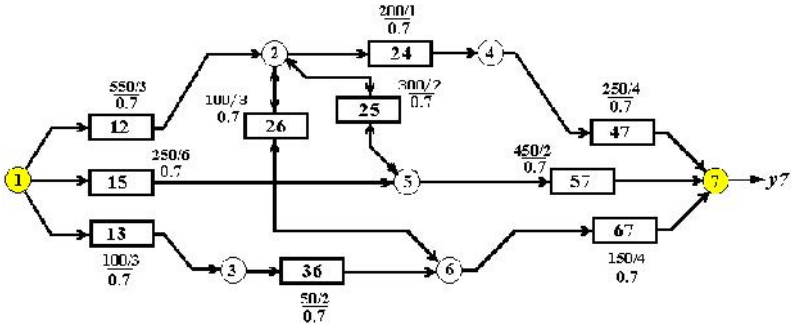


Рисунок 1.4 – Блок-схема работоспособности электрической сети

В БС на рисунке 1.4 пронумерованными прямоугольниками представлены ребра сети (см. рисунок 1.2), которые являются ее элементами. Выход y_7 на блок-схеме представляет заданный в примере критерий работоспособности электрической сети – обеспечение питанием (полностью или частично) хотя бы одного из трех потребителей 47, 57 или 67.

Логическая составляющая технологии БС состоит в том, что с помощью последовательного соединения представляются конъюнктивные условия (операция "И" алгебры логики) нерезервированного функционирования группы элементов. С помощью параллельного соединения в БС представляются дизъюнктивные условия (операция "ИЛИ" алгебры логики) резервирования групп элементов и подсистем. Какие-либо другие способы и формы представления логических операций в типовых БС отсутствуют.

Сравнение рисунков 1.4 и 1.2 показывает, что по форме БС работоспособности практически совпадает с исходным графом функциональной схемы рассматриваемого примера электрической сети. Это характерное свойство аппарата БС существенно облегчает (в сравнении с аппаратом ДО, см. рисунок 1.3) методику их разработки на этапе постановки задач логико-вероятностного моделирования многих видов и классов структурно-сложных системных объектов и процессов.

В настоящее время разработаны и используются на практике как ручные [4-6, 17, 25], так и машинные (автоматизированные) методы и программные средства (например, Windchill RBD [41]) структурного вероятностного моделирования и расчета показателей систем на основе БС их работоспособности.

На следующем этапе технологии БС определяется логическая *функция работоспособности системы* (ФРС), которая в минимальной дизъюнктивной нормальной форме представляет все *кратчайшие пути успешного функционирования* (КПУФ) [4-6]

$$\boldsymbol{Yp} = \boldsymbol{L_1} \vee \boldsymbol{L_2} \vee \ldots \vee \boldsymbol{L_k} \vee \ldots \vee \boldsymbol{L_K} = \bigvee_{k=1}^{K} \boldsymbol{L_k} = \bigvee_{k=1}^{K} \Big(\bigwedge_{i \in L_j} \boldsymbol{x_i} \Big). \qquad (1.8)$$

В выражении (1.8) используются следующие обозначения:

Yp – критерий работоспособности (безотказности) системы;

L_k – конъюнкция КПУФ;

i – номер элемента системы (простой логической переменной);

k – номер конъюнкции $\boldsymbol{L_k}$ (КПУФ);

x_i – событие безотказной работы элемента $\boldsymbol{i}$ системы;

$\wedge$ – операция конъюнкции в логической функции (логическое произведение);

$\vee$ – операция дизъюнкции в логической функции (логическое сложение);

K – число конъюнкций $\boldsymbol{L_k}$ в логической ФРС.

В рассматриваемом примере в результате логического моделирования на основе БС, изображенной на рисунке 1.4, по критерию $\boldsymbol{Yp} = \boldsymbol{y_7}$ получена следующая МДНФ логической ФРС рассматриваемой электрической системы (см. рисунки 1.1 и 1.2), состоящая из девяти КПУФ:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Yp} = \boldsymbol{y_7} = \boldsymbol{x_{67}} \wedge \boldsymbol{x_{26}} \wedge \boldsymbol{x_{25}} \wedge \boldsymbol{x_{15}} \vee \\ \vee\ \boldsymbol{x_{67}} \wedge \boldsymbol{x_{26}} \wedge \boldsymbol{x_{12}} \vee \\ \vee\ \boldsymbol{x_{67}} \wedge \boldsymbol{x_{36}} \wedge \boldsymbol{x_{13}} \vee \\ \vee\ \boldsymbol{x_{47}} \wedge \boldsymbol{x_{25}} \wedge \boldsymbol{x_{24}} \wedge \boldsymbol{x_{15}} \vee \\ \vee\ \boldsymbol{x_{47}} \wedge \boldsymbol{x_{36}} \wedge \boldsymbol{x_{26}} \wedge \boldsymbol{x_{24}} \wedge \boldsymbol{x_{13}} \vee \\ \vee\ \boldsymbol{x_{47}} \wedge \boldsymbol{x_{24}} \wedge \boldsymbol{x_{12}} \vee \\ \vee\ \boldsymbol{x_{57}} \wedge \boldsymbol{x_{36}} \wedge \boldsymbol{x_{26}} \wedge \boldsymbol{x_{25}} \wedge \boldsymbol{x_{13}} \vee \\ \vee\ \boldsymbol{x_{57}} \wedge \boldsymbol{x_{25}} \wedge \boldsymbol{x_{12}} \vee \\ \vee\ \boldsymbol{x_{57}} \wedge \boldsymbol{x_{15}} \end{aligned} \qquad (1.9)$$

Логическая функция (1.9) в комбинаторном виде представляет отдельные девять КПУФ, которые в совокупности определяют **554** Марковских состояния

работоспособности рассматриваемой в примере электрической сети (вычислено на основе преобразования функции (1.9) в СДНФ). Общее количество возможных переходов в этой эквивалентной Марковской цепи составляет **13753**. Это делает практически невозможным применение методов Марковского моделирования для ручного анализа данной системы.

На следующем этапе ЛВМ БС логическая функция (1.8) используется для выполнения расчетов вероятностных показателей надежности исследуемого системного объекта. Для этого могут быть применены приближенные и точные методы вычислений. Если выполнить расчет надежности непосредственно по функции (1.9) рассматриваемого примера по приближенной расчетной формуле вида (1.4), то приближенное значение вероятности безотказной работы сети составит

$$p(Yp) \approx p(y_7) \approx P_C \approx 0.96202322\,2120709 \,. \qquad (1.10)$$

Результат (1.10) не согласуется с полученной ранее этим же методом верхней оценкой (1.5) приближенной вероятности отказа рассматриваемой электрической системы, поскольку в сумме эти показатели (отказа и безотказности) дают значение вероятности 1.139062185441773, превышающее единицу.

Указанная проблема решена в классических монотонных ЛВМ [4-6, 17, 25] путем разработки специальных методов построения на основе логических функций работоспособности (1.8) правильных аналитических расчетных многочленов вероятностных функций (ВФ), на основе которых вычисляются точные (в рамках принятых допущений) вероятностные показатели. Полученный на основе логической ФРС (1.9) рассматриваемого примера одним из указанных монотонных ЛВМ расчетный многочлен ВФ безотказности электрической системы содержит 33 одночлена.

$$
\begin{aligned}
\mathbf{Pc} = {} & p_{36}\, q_{67}\, p_{57}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{13}\, q_{12}\, q_{15} + \\
& + p_{36}\, q_{67}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{24}\, p_{13}\, q_{12} + \\
& + p_{67}\, q_{57}\, p_{26}\, p_{25}\, q_{12}\, p_{15} + \\
& + q_{57}\, p_{47}\, p_{25}\, p_{24}\, q_{12}\, p_{15} + \\
& + p_{57}\, p_{25}\, p_{12}\, q_{15} + \\
& + p_{36}\, p_{67}\, p_{13} + \\
& + p_{67}\, p_{26}\, p_{12} + \\
& + p_{47}\, p_{24}\, p_{12} + \\
& + p_{57}\, p_{15} - \\
& - p_{57}\, p_{47}\, p_{24}\, p_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{67}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{24}\, p_{12} - \\
& - p_{67}\, p_{57}\, p_{26}\, p_{12}\, p_{15} + \\
& + p_{67}\, p_{57}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{24}\, p_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{36}\, p_{67}\, p_{26}\, p_{13}\, p_{12} - \\
& - p_{36}\, p_{67}\, p_{47}\, p_{24}\, p_{13}\, p_{12} - \\
& - p_{36}\, p_{67}\, p_{57}\, p_{13}\, p_{15} + \\
& + p_{36}\, p_{67}\, p_{57}\, p_{47}\, p_{24}\, p_{13}\, p_{12}\, p_{15} + \\
& + p_{36}\, p_{67}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{24}\, p_{13}\, p_{12} + \\
& + p_{36}\, p_{67}\, p_{57}\, p_{26}\, p_{13}\, p_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{36}\, p_{67}\, p_{57}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{24}\, p_{13}\, p_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{36}\, p_{67}\, p_{57}\, p_{25}\, p_{13}\, p_{12}\, q_{15} - \\
& - p_{67}\, p_{57}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{12}\, q_{15} - \\
& - p_{57}\, p_{47}\, p_{25}\, p_{24}\, p_{12}\, q_{15} + \\
& + p_{67}\, p_{57}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{24}\, p_{12}\, q_{15} + \\
& + p_{36}\, p_{67}\, p_{57}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{13}\, p_{12}\, q_{15} + \\
& + p_{36}\, p_{67}\, p_{57}\, p_{47}\, p_{25}\, p_{24}\, p_{13}\, p_{12}\, q_{15} - \\
& - p_{36}\, p_{67}\, p_{57}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{24}\, p_{13}\, p_{12}\, q_{15} - \\
& - p_{36}\, p_{67}\, q_{57}\, p_{47}\, q_{26}\, p_{25}\, p_{24}\, p_{13}\, q_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{67}\, q_{57}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{24}\, q_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{36}\, p_{67}\, q_{57}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{13}\, q_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{36}\, q_{67}\, q_{57}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{24}\, p_{13}\, q_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{36}\, q_{67}\, p_{57}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{24}\, p_{13}\, q_{12}\, p_{15} - \\
& - p_{36}\, q_{67}\, p_{57}\, p_{47}\, p_{26}\, p_{25}\, p_{24}\, p_{13}\, q_{12}\, q_{15}
\end{aligned}
\qquad (1.11)
$$

На основе многочлена ВФ (1.11) вычислено точное значение вероятности безотказной работы рассматриваемой электрической системы

$$\boldsymbol{p(Yp)} \;\mathrm{Z}\; \boldsymbol{p(y_7)} \;\mathrm{Z}\; \boldsymbol{P_C} \;\mathrm{Z}\; \boldsymbol{0.87434528\,86}\ . \qquad (1.12)$$

Результат (1.12) полностью согласуется с приведенным ранее точным значением (1.6) вероятности отказа данной системы (в сумме дают ровно 1.0).

Удобство постановки задач в форме блок-схем работоспособности и возможность расчетов точных значений вероятностных показателей устойчивости является важным преимуществом технологии ЛВМ БС в сравнении с технологией ЛВМ ДО.

Существенным положительным фактором является то обстоятельство, что многие известные методы детерминированного моделирования и расчетов показателей различных систем с сетевой структурой [28-35] также основываются на использовании структурных схем сетей, подобных блок-схемам работоспособности (см. рисунки 1.2 и 1.4). Однако разработанные к настоящему времени логико-вероятностные методы и программные средства, основанные на БС [5, 6, 17, 25, 41, 48], имеют ограниченные возможности их прямого использования для расчета детерминированных показателей результативности функционирования систем с сетевой структурой. Так, в рамках рассмотренного примера электрической сети (см. рисунки 1.1. и 1.2) эти ограничения проявляются в следующем:

– На основе БС работоспособности систем классические ЛВМ [4-6, 17, 25, 41] не позволяют строить логические модели отказов в форме МСО, которые

необходимы для расчетов значений максимальных потоков мощности в электрических сетях.

– Определяемые с помощью ЛВМ БС логические функции в форме кратчайших путей успешного функционирования (1.8) являются комбинаторными по построению, поскольку комбинаторным является основной аппарат моделирования – сама алгебра логики. Это не позволяет в рамках классических ЛВМ представить и учесть варианты детерминированных последовательностей функционирования элементов, что принципиально необходимо для реализации существующих [33, с.70-79] и разработки новых методов и методик моделирования и расчета показателей результативности функционирования сложных системных объектов и процессов с сетевой структурой.

– В технологии БС (как и в технологии ДО) моделирование и расчеты показателей выполняются в предположении, что достоверным всегда является единственное начальное (исходное) состояние системы – все элементы работоспособны. Это ограничивает (практически не позволяет) использование технологий и программных средств БС и ДО для мониторинга риска функционирования, когда в процессе эксплуатации необходимо оперативно учитывать возникающие достоверные изменения текущих состояний объекта.

– В ЛВМ БС (аналогично и в ЛВМ ДО) можно использовать только один критерий моделирования – общий выход (сток) блок-схемы работоспособности, что не позволяет решать задачи многовариантного и многорежимного вероятностного и детерминированного анализа систем.

1.1.5 Возможности и ограничения общего логико-вероятностного метода

К настоящему времени глубоко и полно разработаны теоретические основы общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) [7-9, 15, 18-23, 42-46, 48-51, 66, 68]. На базе ОЛВМ созданы теория, технология и программные комплексы автоматизированного структурно-логического моделирования [18-20, 23].

Главным отличием ОЛВМ от методов и технологий ДО и БС является

выполненная впервые реализация всех возможностей классической алгебры логики в общем базисе операций "И", "ИЛИ" и "НЕ" (инвертирования), а также применение нового логически полного графического аппарата структурного описания моделируемых свойств систем – схем функциональной целостности [7, 9, 22, 51, 66, 68]. Логическая полнота позволяет с помощью СФЦ строить структурные модели, а с помощью ОЛВМ решать все виды задач, которые рассматриваются отдельно в технологии ДО и в технологии БС [48, 51]. Кроме того, ОЛВМ и аппарат СФЦ впервые позволяют моделировать различные свойства принципиально нового класса – немонотонных процессов функционирования структурно-сложных системных объектов [9].

Построение СФЦ (как и ДО, и БС) является сугубо творческим процессом постановки задачи. При этом трудоемкость разработки правильной СФЦ, в зависимости от выбранного подхода к моделированию, не превышает трудоемкости уже рассмотренных процессов построения блок-схем и деревьев отказов.

Для ручного или машинного вероятностного решения рассматриваемого примера с помощью ОЛВМ необходимо на основе описания электрической сети и ее функциональной схемы (см. рисунки 1.1 и 1.2) выбрать прямой, обратный или смешанный подход к моделированию.

При выборе прямого подхода выполняется построение СФЦ работоспособности (безотказности) исследуемого объекта. На рисунке 1.5 приведен вариант прямой СФЦ работоспособности рассматриваемого примера электрической сети.

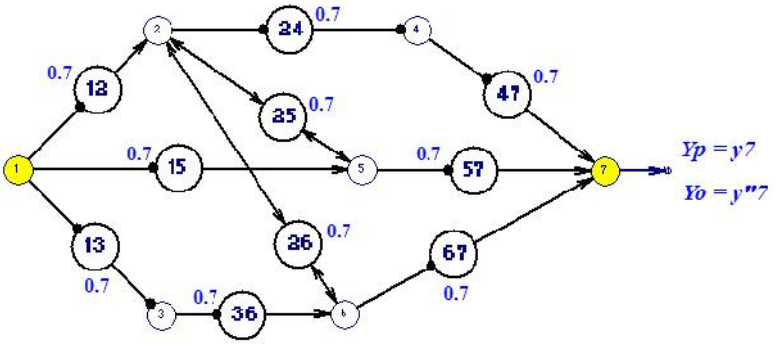


Рисунок 1.5 – СФЦ работоспособности электрической сети

Эта СФЦ эквивалентна исходной функциональной схеме электрической сети, приведенной на рисунке 1.2, и блок-схеме, изображенной на рисунке 1.4. В СФЦ на рисунке 1.5 с помощью функциональных вершин (кружки большой величины с номерами $\boldsymbol{i}$ = 12, 13, …, 67) представлены прямые исходы бинарных событий $\boldsymbol{x_i}$ безотказной работы соответствующих элементов $\boldsymbol{i}$ электрической сети (см. рисунки 1.1 и 1.2). Запись "0.7" около каждой функциональной вершины определяет заданную в примере вероятность каждого из элементарных событий (1.2).

С помощью направленных ребер (дуг), исходящих из вершин СФЦ, представляются логические условия работы и взаимодействия элементов в системе.

Исходящие из вершины $\boldsymbol{i}$ СФЦ ребра могут быть двух видов:

– прямой выход $i \xrightarrow{y_i}$ – представляет все логические условия $\boldsymbol{yi}$ реализации выходной системной функции элементом $\boldsymbol{i}$;

– обратный (инверсный) выход $i \xrightarrow{y''i}$ – представляет все логические условия $\boldsymbol{y''_i}$ не реализации элементом $\boldsymbol{i}$ выходной системной функции.

Заходящие в вершины СФЦ ребра (дуги) со стрелками представляют условия резервированного (дизъюнктивного) обеспечения ($\boldsymbol{y_i}$ Ę $\boldsymbol{y_j}$ Ę **...**), а ребра с точками ($\boldsymbol{y_i}$ ė $\boldsymbol{y_j}$ ė **...**) – не резервированного (совместного, конъюнктивного) обеспечения работы соответствующих элементов, подсистем и исследуемой системы в целом.

Так в СФЦ на рисунке 1.5 три заходящие в фиктивную вершину 7 (сток) дизъюнктивные дуги представляют заданный вариант логического критерия функционирования электрической сети

$$\boldsymbol{Yp} \text{ Z } \boldsymbol{y_7} \text{ Z } \boldsymbol{y_{47}} \text{ Ę } \boldsymbol{y_{57}} \text{ Ę } \boldsymbol{y_{67}} . \qquad (1.13)$$

СФЦ работоспособности на рисунке 1.5 практически совпадает с исходной функциональной схемой системы (см. рисунок 1.2) и блок-схемой работоспособности (см. рисунок 1.4). Поэтому трудоемкость ОЛВМ построения прямых СФЦ не превышает трудоемкости построения блок-схем работоспособности исследуемых системных объектов.

При выборе обратного подхода к моделированию логическая полнота ОЛВМ позволяет выполнить построение СФЦ в форме дерева неработоспособности (отказа) исследуемого объекта. Вариант такой СФЦ дерева неработоспособности рассматриваемого примера приведен на рисунке 1.6.

СФЦ дерева отказов на рисунке 1.6 представляет логические условия не обеспечения питанием (ни полностью, ни частично) всех трех потребителей 47, 57 и 67 рассматриваемого примера электрической сети (см. рисунки 1.1 и 1.2). Эта СФЦ подобна ранее разработанному дереву отказов данной электрической сети, изображенному на рисунке 1.3. Введено только одно непринципиальное отличие. Функциональными вершинами $\boldsymbol{i}$ = 12, 13, …, 67 СФЦ ДО представлены не события отказов (как вершины в ДО на рисунке 1.3), а события $\boldsymbol{x_i}$ безотказной работы соответствующих элементов электрической сети (как и в СФЦ БС на рисунке 1.5). Противоположные исходы событий отказов этих элементов представлены в СФЦ ДО на рисунке 1.6 с помощью инверсных выходов $\boldsymbol{y''_i}$ связей функционального подчинения.

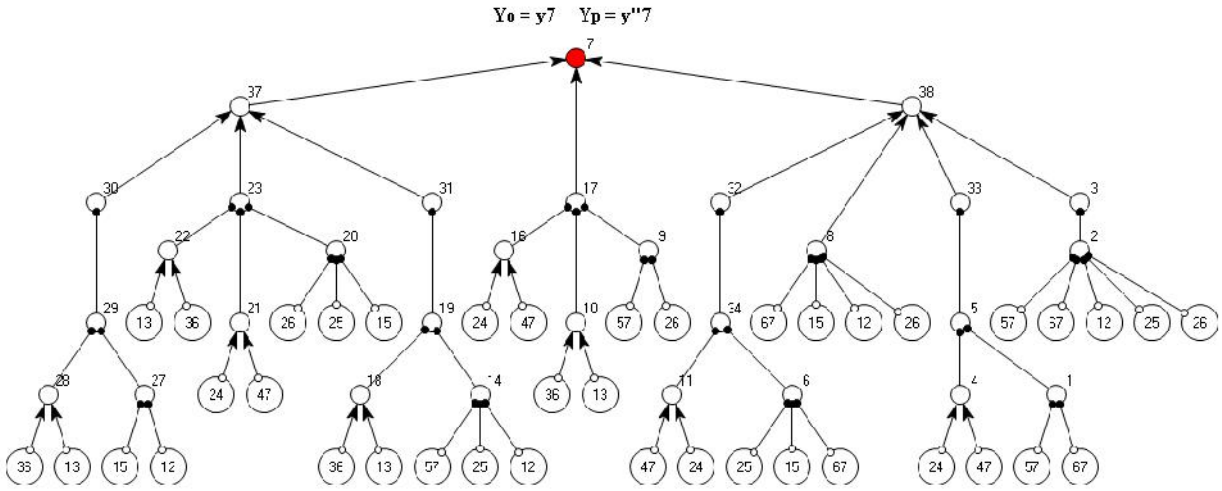


Рисунок 1.6 – СФЦ дерева отказов электрической сети

СФЦ дерева отказов на рисунке 1.6 практически совпадает со стандартным графом ДО, приведенным на рисунке 1.2. Поэтому трудоемкость построения обратных СФЦ неработоспособности систем в ОЛВМ не превышает трудоемкости построения деревьев отказов.

Таким образом, первым важным преимуществом ОЛВМ является его логическая полнота, которая позволяет в одном методическом базисе строить как

прямые (СФЦ БС), так и обратные (СФЦ ДО) структурные модели свойств исследуемых системных объектов, а также любые их немонотонные комбинации.

Другое важное преимущество состоит в том, что ОЛВМ и технология АСМ позволяют на основе любой прямой или обратной СФЦ формировать как прямые (работоспособность, безотказность (1.8), (1.11)), так и обратные (неработоспособность, отказ (1.3), (1.4)) аналитические модели (логические функции и многочлены ВФ). Это позволяет с помощью ОЛВМ рассчитывать соответствующие точные (1.6), (1.12) и приближенные (1.5), (1.10) вероятностные показатели [9, 42, 48].

Так, например, при использовании ОЛВМ для моделирования и расчета вероятности безотказной работы рассматриваемой электрической системы (см. рисунки 1.1. и 1.2) на основе СФЦ дерева отказов (рисунок 1.6) необходимо задать логический критерий $\boldsymbol{Yp}\,\mathrm{Z}\,\boldsymbol{y''_7}$. В результате будут сформированы логическая функция работоспособности (1.9), расчетный многочлен (1.11) и вычислено значение (1.12) вероятности безотказной работы электрической сети. На основе той же СФЦ ДО (рисунок 1.6), изменив только критерий на $\boldsymbol{Yo}\,\mathrm{Z}\,\boldsymbol{y_7}$, с помощью ОЛВМ будут сформированы логическая функция минимальных сечений отказов (см. таблицу 1.1), соответствующий многочлен расчетной вероятностной функции отказа (содержит 42 одночлена) и будет вычислено точное значение (1.6) вероятности отказа электрической сети.

Абсолютно те же результаты могут быть получены с помощью ОЛВМ и при использовании СФЦ блок-схемы работоспособности рассматриваемого примера электрической сети (см. рисунок 1.5). При этом необходимо только задать критерий $\boldsymbol{Yp}\,\mathrm{Z}\,\boldsymbol{y_7}$ для моделирования безотказности и критерий $\boldsymbol{Yo}\,\mathrm{Z}\,\boldsymbol{y''_7}$ для моделирования отказа (определения всех минимальных сечений и расчета вероятности отказа) рассматриваемого примера электрической сети.

1.1.6 Выводы по результатам сравнительного анализа

1 Выполненный сравнительный анализ модельных возможностей трех логико-вероятностных методов (ЛВМ ДО, ЛВМ БС и ОЛВМ) показал существенное преимущество ОЛВМ по следующим положениям:

– в ОЛВМ уже реализованы все основные возможности как метода ЛВМ ДО, так и метода ЛВМ БС;

– впервые реализованная в ОЛВМ функционально полная база логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ" обеспечивает возможность теоретической разработки и программной реализации методов моделирования и расчетных методик как монотонного, так и принципиально нового вида задач немонотонного моделирования структурно-сложных системных объектов и процессов различного назначения [9, 42];

– ОЛВМ впервые позволяет пользователю выбирать и применять разные подходы (прямой, обратный и их смешанные комбинации) к постановке задач моделирования структурно-сложных объектов различного назначения [9, 50];

– в ОЛВМ и программных комплексах технологии АСМ [18, 19, 20, 23] реализована возможность задания не одного (как в ЛВМ ДО и ЛВМ БС), а множества различных критериев функционирования и отказа системы, что позволяет решать задачи многовариантного и многорежимного анализа систем.

2 Вместе с тем, в ОЛВМ сохранился ряд существенных ограничений, свойственных ДО и БС, среди которых, в рамках темы данного исследования, можно выделить следующие основные:

− комбинаторность формирования логических моделей функционирования систем (нет учета последовательностей событий), что не позволяет реализовать существующие и разрабатывать новые методы и методики детерминированного моделирования и расчета показателей результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой;

− в ОЛВМ, как и во всех других ЛВМ, структурное моделирование и расчет показателей осуществляется в предположении, что достоверным всегда является

единственное исходное начальное состояние системы – все элементы работоспособны. Это не позволяет использовать ОЛВМ и программные комплексы технологии АСМ для мониторинга риска функционирования систем в процессе эксплуатации, в котором необходим учет возникающих достоверных изменений текущих состояний системы;

− в ОЛВМ, как и в других ЛВМ, не разработаны новые и не внедрены существующие методы и методики детерминированного анализа результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой различных видов, классов и назначения.

3 Полученные результаты сравнительного анализа трех основных классов логико-вероятностных методов позволяют сделать научно и практически обоснованный выбор ОЛВМ в качестве теоретической и методической базы решения главной научной задачи диссертации – разработки нового методического аппарата (метода, методик и программно-алгоритмических средств) структурно-логического моделирования и расчета детерминированных показателей результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой.

В таблице 1.2 представлены результаты выполненного сравнительного анализа существующих и разрабатываемых в диссертации методов и программно-алгоритмических средств логико-вероятностного и детерминированного анализа систем.

Приведенные в таблице 1.2 результаты показывают:

1 Ни один из существующих отечественных и зарубежных ЛВМ и соответствующих ПАК не позволяет выполнять детерминированный анализ сложных систем с сетевой структурой и учитывать изменения начальных состояний.

2 Ни один из существующих детерминированных методов расчета СС не позволяет выполнять вероятностный анализ исследуемых систем.

3 Наиболее универсальными средствами вероятностного анализа систем являются ОЛВМ и соответствующие программные комплексы "АРБИТР" и "ПК АСМ 2001" [68].

4 Наиболее перспективным является выбор ОЛВМ для разработки на основе

его развития нового сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования, методик и процедур расчета показателей результативности сложных систем с сетевой структурой.

5 Для обеспечения полноты и универсальности направить разработку методов и методик структурно-логического моделирования на анализ двух разных видов сложных систем с сетевой структурой – сетевых планов работ и потоковых сетей.

6 Внедрение ОЛВМ и разрабатываемых метода и методик структурно-логического моделирования в новый унифицированный программный комплекс "ПК АСМ ЛВДМ" впервые обеспечивает возможность решения указанных классов задач совместного вероятностного и детерминированного анализа сложных систем с сетевой структурой.

Таблица 1.2 – Сравнение возможностей существующих и разрабатываемых методов и программно-алгоритмических комплексов

Методы и ПАК	Структурные модели						Математические модели системы		Вычисления показателей			Учет последовательностей событий СС	Учет изменений начальн. состояния
									вероятностные		детерминированные		
	ДО	ДС	БС	СФЦ	СПР	ПС	монотон.	немонотон.	приближенные	точные			
Характеристики существующих (типовых) ЛВМ и ПАК													
Деревьев отказов Risk Spectrum SAPHIRE-7 Windchill FTA RISK,CRISS-4.0	–	–	–	–	–	–	+	–	+	–	–	–	–
Блок-схем работоспособности Windchill RBD	–	–	+	–	–	–	+	–	–	+	–	–	–
ОЛВМ АРБИТР ПК АСМ 2001	+	+	+	+	–	–	+	+	+	+	–	–	–
Характеристики существующих детерминированных методов и ПАК													
Расчет СПР GraphMaker, СПУ2, ProjectManager	–	–	–	–	+	–	+	–	+	+	+	+	±
Расчет ПС RastrWin, РТП3	–	–	–	–	–	+	+	–	–	+	+	+	–
Характеристики разрабатываемых в диссертации метода, методик и ПАК													
ОЛВМ-СГМ сложных систем ПК АСМ ЛВДМ	+	+	+	+	±	±	+	+	+	+	±	+	+

1.2 Постановка задачи структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой

Результаты выполненного в разделе 1.1 сравнительного анализа существующих методов и программно-алгоритмических средств структурного моделирования сложных систем позволили поставить следующую задачу диссертационного исследования: необходимо на базе общего логико-вероятностного метода разработать методический аппарат (метод, методики, процедуры, а также программное и алгоритмическое обеспечение), позволяющий выполнять анализ (моделирование и расчет детерминированных показателей) двух видов сложных систем с сетевой структурой – сетевых планов работ и потоковых сетей. При этом необходимо выполнить еще одно условие – сохранить возможность вероятностного анализа (моделирование и расчет вероятностных показателей) исследуемых систем.

Далее представлена формализованная постановка задачи. Математическая модель сложной системы с сетевой структурой (графа потоковой сети или сетевого графика работ) может быть представлена в виде следующего отношения $r \subset \langle X, R \rangle$, где X – множество, на котором задается отношение (элементы сети, работы сетевого графика), а $R \subset X^2$ – график отношения. Множество X можно представить следующим образом $X = X_J \cup X_H \cup X^V$, где $X_J = \{x_J^k, k = 1,...,K\}$ – множество начальных вершин (исток в потоковой сети или начальная работа в сетевом графике); $X_H = \{x_H^l, l = 1,...,L\}$ – множество конечных вершин (сток в потоковой сети или конечная работа в сетевом графике); $X^V = \{x_j, j = 1,...,N\}$ – множество внутренних вершин (элементы потоковой сети или работы сетевого графика).

Веса на дугах задаются отображением отношения r на вещественную ось R^1 с помощью некоторой функции $f : r \to R^1$. Таким образом, сложную систему с сетевой структурой можно определить как граф с заданной на нем функцией, которую будем называть показателем качества дуг графа (элементов графика отношения R).

Для анализа систем с сетевой структурой необходимо решить две задачи:

− найти пути, удовлетворяющие определенным условиям;

− вычислить различные числовые характеристики системы.

При решении первой задачи необходимо найти множество допустимых путей $S = \{S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle)\}$, где $k=1, \dots, K$; $l=1, \dots, L$; $j=1, \dots, S_{kl}$ – множество путей из X_- в X_+. Эти пути должны удовлетворять определенным условиям. Например, для сетевых графиков условием будет длительность пути

$$\varphi_j(S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle)) = \sum_{\langle x_\text{¬}, x_\text{«} \rangle \in S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle)} f(\langle x_\text{¬}, x_\text{«} \rangle) \le T_{КП},$$

где $T_{КП}$ – длительность критического пути. Для потоковых сетей это может быть, например, путь с минимальной или максимальной мощностью:

$$S_{j0}(\langle x_J^{k0}, x_H^{l0} \rangle) \in \arg\min_S \varphi_j(S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle)) \text{ или}$$

$$S_{j1}(\langle x_J^{k1}, x_H^{l1} \rangle) \in \arg\max_S \varphi_j(S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle)).$$

При решении второй задачи задается некоторое значение $\sim_{mn} = f(\langle x_m, x_n \rangle)$ для любой дуги $\langle x_m, x_n \rangle$ или $\langle m, n \rangle$ графа сети. Для потоковых сетей это будут, например, значения мощности, а для сетевых графиков – значения длительностей работ. Тогда значения длительностей путей сетевого графика будут определяться по формуле

$$\varphi_j(S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle)) = \sum_{\langle x_m, x_n \rangle \in S_j(x_J^k, x_H^l)} f(\langle x_m, x_n \rangle) = \sum_{\langle m,n \rangle \in S_j(\langle k,l \rangle)} \sim_{mn}.$$

Недостатком существующих методов анализа сложных систем с сетевой структурой является отсутствие учета одновременно с весами дуг их вероятностных характеристик $p_{mn} = P(\langle x_m, x_n \rangle)$. Учитывая эти характеристики, можно вводить дополнительные условия при решении задач анализа сложных систем с сетевой структурой. Так, например, при выборе путей из множества $S = \{S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle)\}$ необходимо находить наиболее надежные

$S_{над} \in \{ S_j \mid S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle) \in \arg\max_S P(S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle))\}$ или удовлетворяющие необходимому требованию надежности $S_{доп} \in \{ S_j \mid P(S_j(\langle x_J^k, x_H^l \rangle)) \geq P_{доп}\}$, где $P_{доп}$ – допустимый уровень надёжности.

Как видно из таблицы 1, ни один из современных автоматизированных комплексов анализа сложных систем с сетевой структурой не позволяет одновременно решать как задачи сетевого анализа, так и задачи оценки вероятностных показателей. Отсюда и возникает необходимость создания единой методологической платформы для автоматизированного программно-алгоритмического комплекса "ПК АСМ ЛВДМ".

Таким образом, предложенный в диссертационный работе подход позволяет, с одной стороны, сформировать унифицированную технологию расчета широкого класса вероятностных и детерминированных задач, а с другой стороны, получить экономический эффект, связанный с отсутствием необходимости приобретения дорогостоящих коммерческих узкоспециализированных программных комплексов и обучения работы персонала. Стоимость современных программных комплексов в среднем составляет десятки тысяч USD и может быть сопоставима с затратами персонала на их обучение.

1.3 Анализ возможных путей формализации и решения поставленной задачи структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой

После выбора ОЛВМ в качестве базовой методологии центральное место в решении главной научной задачи диссертации начинают занимать вопросы его целенаправленного развития и разработки новых специализированных метода, методик, правил, процедур, а также математического и алгоритмического обеспечения, позволяющие решать новый для него класс задач детерминированного моделирования и расчета показателей сложных систем с сетевой структурой (см.

Приложение 1, п.50) различного назначения. При этом важной дополнительной задачей в разработке указанного детерминированного направления развития ОЛВМ является сохранение достигнутого в теории и технологии АСМ [7-9, 15, 18-23, 48, 50, 51, 64, 66, 68] уровня возможностей вероятностного моделирования и расчета показателей устойчивости сложных системных объектов и процессов.

1.3.1 Задача разработки сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования последовательностей событий

Для разработки методик структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой необходимо было сначала разработать метод построения результирующих моделей функционирования исследуемых систем с учетом последовательностей свершаемых событий. Поэтому центральное место в решении главной научной задачи диссертации занимает разработка новых научных положений развития ОЛВМ, позволяющих корректно учитывать в формируемых логических моделях достоверные последовательности событий, представляющие процессы функционирования сложных систем с сетевой структурой. Для решения этой частной научной задачи необходимо, путем развития ОЛВМ, разработать специальный сетевой графоаналитический метод (СГМ) структурно-логического моделирования последовательностей событий, который включает в себя следующие основные положения:

– Разработку правил представления с помощью СФЦ структурных моделей функционирования сетевых системных объектов и процессов (графов сетевых СФЦ) и правил записи соответствующих систем логических уравнений.

– Разработку правил записи сформированных математических моделей функционирования сложных систем с сетевой структурой с помощью дополненного аналитического аппарата – сетевых функций алгебры логики.

– Разработку процедуры решения систем логических уравнений и определения сетевых ФАЛ.

Практической задачей данного раздела диссертации является разработка алгоритма сетевого графоаналитического метода и его программная реализация.

1.3.2 Задача разработки методик структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности сетевых планов и потоковых сетей

Создание сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования последовательностей событий позволит математически строго представлять процессы функционирования сложных систем с сетевой структурой в специальной аналитической форме сетевых функций алгебры логики. Практическое применение этой новой формы математической модели основывается на разработке соответствующих расчетных методик количественной оценки, на основе сетевых ФАЛ, показателей результативности функционирования различных видов сетевых системных объектов.

В рамках настоящей работы были проведены исследования и поставлены частные научные задачи разработки методик структурно-логического моделирования и расчета показателей (СЛМ РП) для двух видов сложных систем с сетевой структурой – систем сетевого планирования и управления [28-30] и потоковых сетевых систем (электрических сетей [32-34], систем водоснабжения и водоотведения [34, 35]).

Решение частной научной задачи создания методики моделирования и расчета показателей сетевых планов включает разработку следующих положений:

– разработку правил представления сетевых графиков работ с помощью сетевых СФЦ;

– разработку правил применения СГМ для построения аналитических моделей сетевых планов работ в форме сетевых ФАЛ;

– разработку правил построения на основе сетевых ФАЛ расчетных методик вычисления следующих двух групп основных показателей результативности сетевых планов работ [28-30]:

Группа 1 – показатели путей сетевого плана:

– $\boldsymbol{T_k}$ – минимальные продолжительности отдельных последовательностей $\boldsymbol{L_k}$ работ (путей) сетевого плана $\boldsymbol{Y_C}$;

– $\boldsymbol{T_{КП}}$ – длительность критических путей реализации сетевого плана $\boldsymbol{Y_C}$;

– $\boldsymbol{R_k}$ – запас времени каждого ***k***-го не критического пути сетевого плана.

Группа 2 – показатели работ сетевого плана:

– $\boldsymbol{t_{P\text{-}H}(i)}$ – ранний срок начала каждой ***i***-й работы сетевого плана;

– $\boldsymbol{t_{P\text{-}O}(i)}$ – ранний срок окончания каждой ***i***-й работы сетевого плана;

– $\boldsymbol{t_{П\text{-}H}(i)}$ – поздний срок начала каждой ***i***-й работы сетевого плана;

– $\boldsymbol{t_{П\text{-}O}(i)}$ – поздний срок окончания каждой ***i***-й работы сетевого плана;

– $\boldsymbol{R_П(i)}$ – полные резервы времени каждой ***i***-й некритической работы;

– $\boldsymbol{R_C(i)}$ – свободные (собственные) резервы времени каждой ***i***-й некритической работы.

Практической задачей данного раздела диссертации является разработка алгоритма и программной реализации методики структурно-логического моделирования и расчета показателей систем сетевого планирования и управления.

Решение второй частной научной задачи создания методики структурно-логического моделирования и расчета показателей потоковых сетей включает разработку следующих положений:

– разработку правил представления графов потоковых сетей с помощью сетевых схем функциональной целостности;

– разработку правил применения сетевого графоаналитического метода для построения аналитических моделей потоковых сетей в форме сетевых функций алгебры логики;

– разработку правил построения на основе сетевых СФЦ и сетевых ФАЛ расчетной методики вычисления максимального потока в сети;

– разработку правил построения на основе сетевых ФАЛ расчетной методики вычисления показателей номинальных и рабочих потоков в сети.

Практической задачей данного раздела диссертации является разработка алгоритмов и программных реализаций методик структурно-логического моделирования и расчета показателей потоковых сетей.

1.3.3 Задача разработки методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы

Существующие логико-вероятностные методы, включая ОЛВМ, разрабатывались для использования, в основном, на предварительных стадиях выполнения научных исследований и проектных разработок. Поэтому традиционной и научно обоснованной для проектного анализа является гипотеза о том, что в начальный момент времени (***t=0***) система достоверно находится только в одном, так называемом, основном начальном состоянии – все элементы работоспособны.

Однако указанное положение существенно ограничивает возможности практического применения методов моделирования для решения задач мониторинга процессов функционирования систем на стадии их эксплуатации, когда реальными становятся достоверные изменения текущих состояний системы вследствие отказов, поражений, отключений, восстановлений и т.п. элементов и подсистем. Поэтому актуальными становятся вопросы разработки третьей методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний систем. Решение этой частной научной задачи диссертации включает в себя разработку следующих положений:

− разработку состава и содержания основных этапов методики структурно-логического моделирования, позволяющей определить детерминированные структурные последствия изменения текущего состояния системы;

− разработку правил учета последствий изменений состояний системы в аналитических моделях (системах логических уравнений, ФАЛ, многочленах ВФ, детерминированных расчетных методиках), вероятностных и детерминированных системных показателях результативности потоковых сетей.

Практической задачей данного раздела диссертации является разработка алгоритма и программной реализации методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы.

1.3.4 Практическая реализация разработанных методов и методик

Практическое применение и дальнейшее развитие результатов решения главной научной задачи диссертации предполагает комплексную (совместную с ранее реализованными в ОЛВМ логико-вероятностными методами [7, 9, 18-20, 66, 68]) автоматизацию разработанных новых методов и методик структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой. Решение этой практической задачи диссертации включает в себя алгоритмический уровень разработки новых метода и методик, а также создание на этой основе унифицированного программного комплекса "ПК АСМ ЛВДМ", в котором:

– реализованы возможности существующего комбинаторного общего логико-вероятностного метода структурного моделирования и расчета показателей свойств устойчивости структурно-сложных систем [18-20, 23];

– внедрены разработанные в диссертации программные модули автоматизации методов и методик структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой и учета детерминированных изменений состояний.

Выводы по главе 1

Выполнена постановка главной научной задачи диссертации – разработка на основе развития ОЛВМ нового методического аппарата (метода, методик, процедур), а также математического алгоритмического обеспечения структурно-логического моделирования и расчета детерминированных показателей результативности функционирования двух классов сложных систем с сетевой структурой – сетевых планов работ и потоковых сетей.

При выполнении исследований, связанных с постановкой задачи разработки методов и методик структурно-логического моделирования и расчета показателей сложных систем с сетевой структурой, были получены следующие основные результаты:

1 Определены основные особенности сетевых систем, как объектов детерминированного моделирования и расчета показателей результативности их функционирования.

2 Обоснован выбор общего логико-вероятностного метода в качестве базового методического аппарата для решения поставленной главной научной задачи диссертации.

3 Осуществлена общая постановка следующих частных научных задач диссертации:

– разработки сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования последовательностей событий;

– разработки методики структурно-логического моделирования и расчета показателей систем сетевого планирования и управления;

– разработки методики структурно-логического моделирования и расчета показателей потоковых сетей;

– разработки методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы;

– разработки алгоритмов и программной реализаций новых метода и методик структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой.

В совокупности, указанная группа частных задач определяет главную научную настоящего диссертационного исследования.

2 Разработка сетевого графоаналитического метода структурно-логического моделирования последовательностей событий в моделях функционирования сложных систем с сетевой структурой

В соответствии с постановкой данной научной задачи (см. §1.3.1), в настоящем разделе разрабатываются основные положения **сетевого графоаналитического метода** структурно-логического моделирования последовательностей событий в моделях функционирования сложных систем с сетевой структурой.

В ходе решения данной задачи были разработаны:

1 правила представления с помощью графического аппарата СФЦ исходных структурных моделей сложных систем с сетевой структурой (построения сетевых СФЦ);

2 дополнительные правила алгебры логики, обеспечивающие корректное представление с помощью сетевых логических функций результирующих детерминированных математических моделей функционирования систем с сетевой структурой;

3 разработка процедуры решения систем логических уравнений, представляющих сетевые СФЦ, и построения детерминированных математических моделей функционирования исследуемых систем в форме сетевых функций алгебры логики.

2.1 Представление с помощью схем функциональной целостности и логических функций детерминированных моделей функционирования систем

Аппарат СФЦ [51, 7–9, 66, 68] создавался для логико-вероятностного моделирования и расчетов показателей свойств устойчивости структурно-сложных систем различного назначения. Поэтому типовая (комбинаторная) СФЦ является ориентированным графом $G(X, Y)$, где X – множество вершин,

представляющих простые логические переменные и константы, а ***Y*** – множество направленных ребер (дуг), представляющих логические функции. На рисунке 2.1 приведены основные изобразительные средства, типовые графические фрагменты и соответствующие им логические уравнения графического аппарата схем функциональной целостности [9, 42].

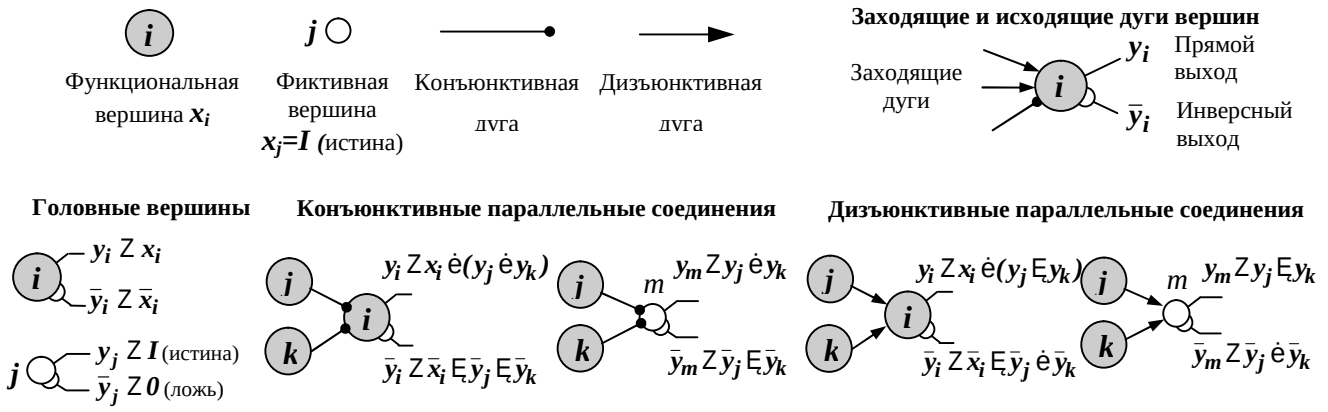


Рисунок 2.1 – Изобразительные средства аппарата СФЦ

Разработанные в ОЛВМ правила построения графов СФЦ являются комбинаторными (строго не учитывают последовательностей событий), поскольку комбинаторным является и основной математической аппарат моделирования – алгебра логики. Это ограничивает возможности корректного представления с помощью СФЦ моделей различных свойств сетевых системных объектов и процессов.

2.1.1 Правила представления с помощью СФЦ графов систем с сетевой структурой

Состав изобразительных средств и базовые логические уравнения комбинаторных СФЦ, разработанные в ОЛВМ [9, раздел 1.4], при построении сетевых СФЦ сохраняются полностью. Сопоставление изобразительных средств комбинаторных СФЦ, приведенных на рисунке 2.1, с типовыми изобразительными средствами представления сетей (см. пример на рисунке 1.2) позволили разработать следующие дополнительные правила представления графов сетей с помощью СФЦ (построения сетевых СФЦ).

1 Все узловые вершины графов сетей (в примере на рисунке 1.2 – вершины 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7) не сопоставлены физическим элементам системы, поэтому в сетевой СФЦ они могут быть представлены фиктивными вершинами с соответствующими номерами.

2 Все ребра (дуги) графов сетей (на рисунке 1.2 отмечены номерами 12, 15, 13, 24, 25, 26, 36, 47, 57, 67) представляют соответствующие физические элементы систем и характеризуются заданными параметрами времени, потоков и др. Поэтому в сетевой СФЦ эти ребра (элементы сетей) должны быть представлены функциональными вершинами, которые аналитически (в системах логических уравнений и ФАЛ) обозначаются простыми логическими переменными $\boldsymbol{x_i}$ Č $\boldsymbol{X}$ с соответствующими номерами $\boldsymbol{i}$ и параметрами времени работы, пропускной способности, и др.

3 Ребра графов сетей также используются для указания реализованных в системе последовательностей событий (работ) и направлений потоков. Они могут быть однонаправленными (в примере на рисунке 1.2 ребра 12, 15, 13, 24, 36, 47, 57 и 67) и двунаправленными (на рисунке 1.2 ребра 25 и 26). Информация о направленности последовательностей событий (работ) в сетевых СФЦ должна представляться с помощью направленных конъюнктивных и/или дизъюнктивных дуг (см. рисунок 2.1) логических связей функционального подчинения, которые аналитически (в системах логических уравнений) обозначаются интегративными функциями $\boldsymbol{y_i}$ Č $\boldsymbol{Y}$ [9, с.91].

4 С помощью конъюнктивных направленных дуг в сетевых СФЦ представляются **отдельные** сетевые конъюнкции (последовательности), события (работы) в которых выполняются строго в указанном порядке.

Разработанные основные правила определяют общие положения методики представления с помощью СФЦ направленности последовательных, параллельных и циклических событий (работ) сложных систем с сетевой структурой. Эти правила не изменяют исходного математического содержания аппарата СФЦ, что сохраняет все прежние возможности его использования для вероятностного моделирования и расчета показателей структурно-сложных

систем с помощью ОЛВМ [7, 9, 66, 68].

Вместе с тем, эти правила позволяют корректно представлять в графах сетевых СФЦ последовательности элементарных событий (работ), которые используются в существующих графах сетевых планов работ и потоковых сетей. Например, граф электрической сети, изображенный на рисунке 1.2, корректно представляется с помощью сетевой СФЦ, изображенной на рисунке 1.5.

Таким образом, разработанные дополнительные правила представления последовательностей событий (работ) моделируемых сетей с помощью графического аппарата СФЦ не изменили состава его основных изобразительных средств. Обязательным стало только строгое представление в сетевых СФЦ направленности потоков с помощью конъюнктивных и/или дизъюнктивных связей функционального подчинения.

Теперь предстоит разработка методики преобразования графов сетевых СФЦ в соответствующие системы логических уравнений. В разрабатываемом сетевом графоаналитическом методе учета последовательностей событий, как и в классическом комбинаторном ОЛВМ, строгим математическим эквивалентом графа сетевой СФЦ остается соответствующая система логических уравнений

$$\boldsymbol{y_i} \text{ Z } \boldsymbol{f(x_i, y_j)} \text{Č} \boldsymbol{Y}, \quad i, j = 1, 2, \ldots, N, \tag{2.1}$$

где: i, j – номера вершин СФЦ;

N – общее число вершин СФЦ;

x_i – простые логические переменные, представляющие события собственной работоспособности элементов системы (ребер сети), которые в сетевой СФЦ обозначаются функциональными вершинами ***i***;

$x_j = I$ (*true*) – для всех фиктивных вершин ***j*** сетевой СФЦ;

y_i, y_j – выходные интегративные функции связей функционального подчинения вершин СФЦ.

В данной работе и сетевые СФЦ, и соответствующие им системы логических уравнений (2.1) определены на классе **монотонных** математических моделей работоспособности сетевых системных объектов и процессов. Поэтому все

логические уравнения (2.1), описывающие сетевые СФЦ, имеют следующие две типовые формы записи:

а) $y_i = x_i \cdot \left(\bigvee_{d \in D_i} y_d \right) \cdot \left(\bigwedge_{k \in K_i} y_k \right)$, когда i – функциональная вершина;

б) $y_i = \left(\bigvee_{d \in D_i} y_d \right) \cdot \left(\bigwedge_{k \in K_i} y_k \right)$, когда i – фиктивная вершина. (2.2)

В (2.2) используются следующие обозначения:

i, d, k – номера вершин СФЦ;

$\vee$ – *операция* логического сложения (дизъюнкции);

$\wedge$ – *операция* логического умножения (конъюнкции);

y_i – *выходная* интегративная функция вершины i;

x_i – *логическая* переменная реализации события/работы i;

y_d – *дизъюнктивные* интегративные функции, заходящие в вершину i (дуги со стрелками);

y_k – *конъюнктивные* интегративные функции, заходящие в вершину i (дуги с точками);

D_i, K_i – множества дизъюнктивных и конъюнктивных дуг, заходящих в вершину i сетевой СФЦ.

Разработанные правила построения сетевых СФЦ и методики их преобразования в систему логических уравнений являются общими для моделирования всех видов сетевых системных объектов и процессов. Вместе с тем, при построении сетевых СФЦ различных видов сетей (например, сетевых планов работ или потоковых сетей) эти общие правила дополняются рядом специальных положений, которые разрабатываются в следующих разделах диссертации.

2.1.2 Правила записи сетевых функций алгебры логики

Следующим и принципиально важным шагом в разработке СГМ учета последовательностей событий является создание математически строго аппарата аналитического представления с помощью логических функций результирующих

моделей функционирования сложных систем с сетевой структурой. В ОЛВМ основным конечным результатом структурно-логического моделирования является логическая функция работоспособности системы (ФРС) [9, с.13; 86], которая определяется с помощью универсального графоаналитического метода (УГМ) [9, с. 124–131]. ФРС в ОЛВМ представляет собой классическую булеву функцию (функцию алгебры логики), которая по определению является комбинаторной [9, 51] и не может корректно представлять детерминированных последовательностей событий (работ) в моделях систем с сетевой структурой.

Поэтому в разрабатываемом сетевом графоаналитическом методе для аналитического представления результатов сетевого моделирования аппарат классической комбинаторной алгебры логики должен быть определенным образом изменен (дополнен). Главное требование состоит в том, что, он должен позволять корректно представлять в логических функциях реально существующие **последовательности событий** (работ, элементов сети), соответствующие заданной сетевой СФЦ.

На рисунке 2.2 приведены четыре варианта представления с помощью графов сетевых СФЦ различных вариантов отдельных сетевых последовательностей (слева направо) трех элементов системы, обозначенных номерами 1, 2 и 3 соответственно.

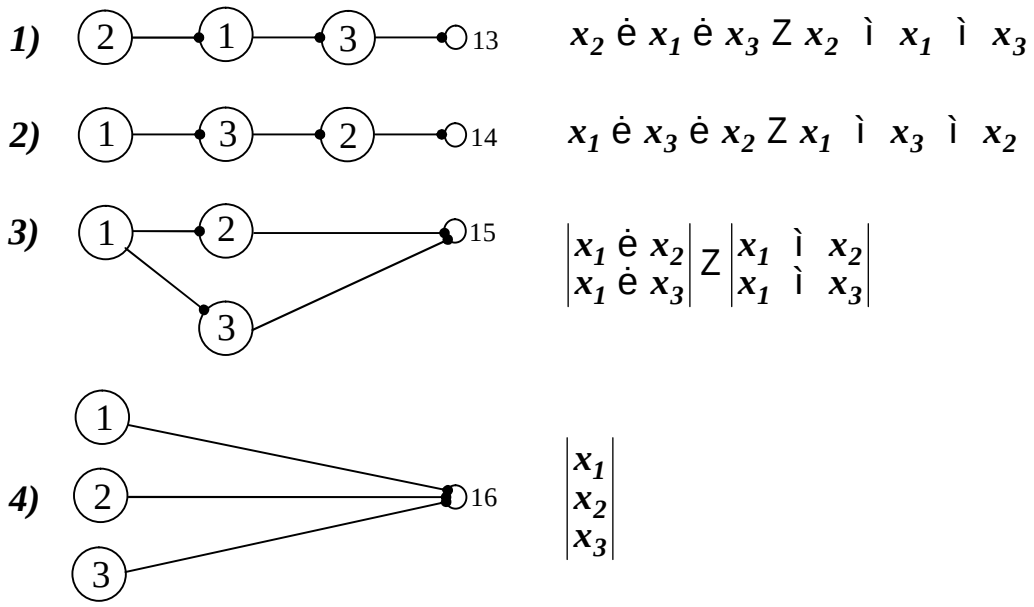


Рисунок 2.2 – Варианты сетевых СФЦ конъюнктивной системы из трех элементов

Конъюнктивность рассматриваемой в примере системы означает, что условием ее работоспособности является выполнение своих функций всеми тремя составляющими элементами. В указанном смысле, все варианты СФЦ на рисунке 2.2 являются логически тождественными, поскольку в классической алгебре логики действует коммутативный закон записи конъюнкций [9, 53]

$$x_i \wedge x_j = x_j \wedge x_i. \qquad (2.3)$$

Из соотношения (2.3) следует, что с помощью существующих ЛВМ на основе всех четырех вариантов СФЦ, изображенных на рисунке 2.2, будет получена одна и та же результирующая комбинаторная логическая ФРС

$$y_{13} = y_{14} = y_{15} = y_{16} = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 = x_3 \wedge x_2 \wedge x_1 = \ldots \qquad (2.4)$$

В выражениях (2.3) и (2.4) все x_i являются простыми логическими переменными, которые представляют события выполнения собственных функций соответствующими элементами системы. Символ "$\wedge$" обозначает операцию логического умножения (конъюнкции).

Рассмотренный пример наглядно иллюстрирует, что сам закон (2.3) определяет комбинаторность аппарата классической алгебры логики, т.е. независимости конъюнкций от порядка (последовательности) записи в них логических переменных (см. (2.4)). Именно поэтому аппарат классической алгебры логики не позволяет математически строго представить указанные на рисунке 2.2 различные варианты детерминированных последовательностей событий/работ элементов сети.

В целях аналитического представления разных детерминированных последовательностей событий в СГМ было предложено исключить действие коммутативного закона (2.3) и детерминированные последовательности событий (работ) аналитически представлять порядком (последовательностью) записи "**слева направо**" простых логических переменных в конъюнкциях сетевых функций алгебры логики.

$$x_i \wedge x_j \wedge x_k \wedge \ldots \wedge x_m = x_i \cdot x_j \cdot x_k \cdot \ldots \cdot x_m. \qquad (2.5)$$

В (2.5) порядок записи (слева направо) простых логических переменных

теперь строго определяет представляемые в графах сетевых СФЦ последовательности элементарных событий/работ сетевой модели. В правой части (2.5) вместо символа операции последовательной конъюнкции (для большей наглядности) используется символ "→". Далее в работе, для удобства изложения материала, будут применяться обе указанные формы записи отдельных последовательных конъюнкций в сетевых функциях алгебры логики.

С помощью введенного дополнения (2.5) в правила записи конъюнкций могут быть получены аналитические решения первых двух задач сетевого моделирования для вариантов 1) и 2) последовательных сетевых СФЦ трехэлементной системы, изображенных на рисунке 2.2:

$$\begin{array}{l} 1)\ y_{13}\ \mathrm{Z}\ x_2\ \dot{e}\ x_1\ \dot{e}\ x_3\ \mathrm{Z}\ x_2\ \ \grave{\imath}\ \ x_1\ \ \grave{\imath}\ \ x_3\,; \\ 2)\ y_{14}\ \mathrm{Z}\ x_1\ \dot{e}\ x_3\ \dot{e}\ x_2\ \mathrm{Z}\ x_1\ \ \grave{\imath}\ \ x_3\ \ \grave{\imath}\ \ x_2\,. \end{array} \qquad (2.6)$$

Для решения варианта 3) последовательно-параллельной сетевой СФЦ, изображенной на рисунке 2.2, необходимо правила (2.5) дополнить способом аналитического представления в записи сетевых функций алгебры логики параллельных групп (множеств) отдельных конъюнктивных последовательностей событий. Для этого предложена матричная (|…|) форма записи в сетевых конъюнкциях множества **конъюнктивных групп** одновременно выполняемых детерминированных последовательностей событий (работ) следующего общего вида

$$\left|\begin{array}{l} x_{1.1}\ \dot{e}\ x_{1.2}\ \dot{e}\ \ldots\ \dot{e}\ x_{1.n} \\ x_{2.1}\ \dot{e}\ x_{2.2}\ \dot{e}\ \ldots\ \dot{e}\ x_{2.m} \\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J} \\ x_{k.1}\ \dot{e}\ x_{k.2}\ \dot{e}\ \ldots\ \dot{e}\ x_{k.d} \end{array}\right| \quad \emptyset \quad \left|\begin{array}{l} x_{1.1}\ \grave{\imath}\ x_{1.2}\ \grave{\imath}\ \ldots\ \grave{\imath}\ x_{1.n} \\ x_{2.1}\ \grave{\imath}\ x_{2.2}\ \grave{\imath}\ \ldots\ \grave{\imath}\ x_{2.m} \\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J} \\ x_{k.1}\ \grave{\imath}\ x_{k.2}\ \grave{\imath}\ \ldots\ \grave{\imath}\ x_{k.d} \end{array}\right| \qquad (2.7)$$

Следует отметить, что параллельность выполнения последовательных групп работ в предложенных аналитических записях сетевых конъюнкций не означает их резервирования. То есть выходная системная функция, представляемая матрицами (2.7), реализуется при условии выполнения всех указанных в ней *1, 2,* …, *k* параллельных групп последовательностей элементарных событий/работ и не реализуется при не выполнении (отказе, поражении, отключении и т.п.) хотя бы одной из них.

На основе введенных дополнений и правил (2.5), (2.7) записи последовательных логических функций в алгебре логики получены следующие равнозначные варианты аналитических решений задачи 3) сетевой СФЦ, изображенной на рисунке 2.2.

$$x_1 \text{ ė } \begin{vmatrix} x_2 \\ x_3 \end{vmatrix} \text{ Z } x_1 \text{ ì } \begin{vmatrix} x_2 \\ x_3 \end{vmatrix} \text{ Z } \begin{vmatrix} x_1 \text{ ė } x_2 \\ x_1 \text{ ė } x_3 \end{vmatrix} \text{ Z } \begin{vmatrix} x_1 \text{ ì } x_2 \\ x_1 \text{ ì } x_3 \end{vmatrix} \qquad (2.8)$$

На рисунке 2.2, вариант 4) приведена параллельная сетевая СФЦ, которая представляет конъюнктивное условие параллельного выполнения всех трех элементарных работ. Поэтому согласно (2.7) ей соответствует сетевая функция алгебры логики, состоящая из одной конъюнктивной матрицы

$$\begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{vmatrix}. \qquad (2.9)$$

Наличие в графическом аппарате СФЦ ОЛВМ двух видов направленных ребер (дизъюнктивных со стрелками и конъюнктивных с точками, см. рисунок 2.1) позволяет расширить возможности применения сетевых СФЦ для формализованного представления свойств и режимов работы различных сложных систем с сетевой структурой.

Так, путем замены в графе конъюнктивных ребер на дизъюнктивные можно, например, представить в одной СФЦ несколько альтернативных сетевых планов выполнения работ [43] или резервные варианты распределения сетевых потоков. Учесть указанные структурные и организационные особенности функционирования систем с сетевой структурой позволяет предложенный аналитический аппарат (2.5), (2.7) записи сетевых функций алгебры логики.

В качестве первого тестового примера применения сетевых СФЦ и сетевых ФАЛ в СГМ на рисунке 2.3 приведены несколько вариантов сетевых СФЦ пятиэлементной сети, результаты логического моделирования которых являются очевидными фактами.

На рисунке 2.3.а изображен исходный граф потоковой сети, состоящий из пяти направленных ребер (элементов) и четырех узлов, из которых узел 1 является истоком, а узел 4 – стоком сети.

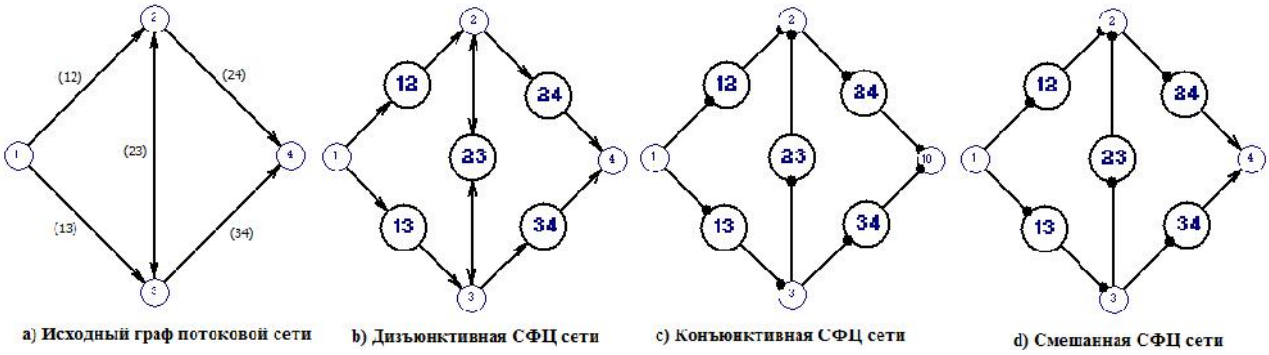


Рисунок 2.3 – Сетевые СФЦ различных вариантов организации потоков в пятиэлементной сети

Дизъюнктивная сетевая СФЦ на рисунке 2.3.b является полным логическим аналогом исходного графа рассматриваемой потоковой сети и представляет все возможные отдельные переходы из истока 1 в сток 4.

Конъюнктивная СФЦ на рисунке 2.3.c определяет один из возможных вариантов организации потоков, при котором цель функционирования системы реализуется совместной работой всех пяти ребер/элементов сети.

Третья, смешанная (конъюнктивно-дизъюнктивная) СФЦ, изображенная на рисунке 2.3.d, представляет три возможных варианта обеспечения стока – или через ребро 24, или через ребро 34, или совместно.

Дизъюнктивная сетевая СФЦ (рисунок 2.3.b) представляет все элементарные пути исходного графа потоковой сети (рисунок 2.3.a) от истока 1 к стоку 4. Поэтому формируемая на ее основе сетевая логическая модель (сетевая ФАЛ) должна представлять собой дизъюнкцию всех возможных элементарных сетевых конъюнкций, каждая из которых определяет кратчайшую последовательность событий переходов от узла истока 1 к узлу стока 4.

Из исходного графа потоковой сети (рисунок 2.3.a) и сетевой СФЦ (рисунок 2.3.b) видно, что таких разных кратчайших последовательностей всего четыре. С помощью предложенного (дополненного) аппарата алгебры логики аналитическое представление этой функции имеет следующий вид

$$Yc\ Z\ x_{12}\ \dot{e}\ x_{24}\ Ę\ x_{13}\ \dot{e}\ x_{23}\ \dot{e}\ x_{24}\ Ę\ x_{13}\ \dot{e}\ x_{34}\ Ę\ x_{12}\ \dot{e}\ x_{23}\ \dot{e}\ x_{34}\ Z\ Z\ x_{12}\ \grave{\imath}\ x_{24}\ Ę\ x_{13}\ \grave{\imath}\ x_{23}\ \grave{\imath}\ x_{24}\ Ę\ x_{13}\ \grave{\imath}\ x_{34}\ Ę\ x_{12}\ \grave{\imath}\ x_{23}\ \grave{\imath}\ x_{34}. \quad (2.10)$$

Конъюнктивная сетевая СФЦ, изображенная на рисунке 2.3.c, представляет

граф потоковой сети, в котором рабочий поток от истока 1 к стоку 4 соответствующим образом распределен по всем элементам (ребрам) и узлам сети. В данной организации сети через узел 3 проходит один поток, а через узел 2 – два потока. Соответствующая этой СФЦ сетевая функция алгебры логики представляет собой одну сетевую конъюнкцию, включающую в себя три конъюнктивные последовательные группы.

В дополненной алгебре логики допустимы следующие матричные формы записи этой сетевой конъюнкции

$$\left|\begin{matrix} x_{12} \dot{e} x_{24} \\ x_{13} \dot{e} x_{23} \dot{e} x_{24} \\ x_{13} \dot{e} x_{34} \end{matrix}\right| Z \left|\begin{matrix} x_{12} \dot{e} x_{24} \\ x_{13} \dot{e} \left|\begin{matrix} x_{23} \dot{e} x_{24} \\ x_{34} \end{matrix}\right| \end{matrix}\right| \quad ø \quad \left|\begin{matrix} x_{12} \ ì \ x_{24} \\ x_{13} \ ì \ x_{23} \ ì \ x_{24} \\ x_{13} \ ì \ x_{34} \end{matrix}\right| Z \left|\begin{matrix} x_{12} \ ì \ x_{24} \\ x_{13} \ ì \ \left|\begin{matrix} x_{23} \ ì \ x_{24} \\ x_{34} \end{matrix}\right| \end{matrix}\right| \qquad (2.11)$$

Смешанная, конъюнктивно-дизъюнктивная сетевая СФЦ, приведенная на рисунке 2.3.d, представляет потоковую сеть, в которой графически определены два варианта реализации рабочего потока от истока 1 к стоку 4. Один вариант представляет поток к потребителю 24, а второй – к потребителю 34. Сетевая ФАЛ этой модели содержит две последовательно-параллельные конъюнкции

$$\begin{matrix} x_{13} \dot{e} x_{34} Ę \left|\begin{matrix} x_{12} \dot{e} x_{24} \\ x_{13} \dot{e} x_{23} \dot{e} x_{24} \end{matrix}\right| Z \ x_{13} \dot{e} x_{34} Ę \left|\begin{matrix} x_{12} \\ x_{13} \dot{e} x_{23} \end{matrix}\right| \dot{e} x_{24} \quad ø \\ ø \quad x_{13} \ ì \ x_{34} Ę \left|\begin{matrix} x_{12} \ ì \ x_{24} \\ x_{13} \ ì \ x_{23} \ ì \ x_{24} \end{matrix}\right| Z \ x_{13} \ ì \ x_{34} Ę \left|\begin{matrix} x_{12} \\ x_{13} \ ì \ x_{23} \end{matrix}\right| \ ì \ x_{24} \end{matrix} \qquad (2.12)$$

Анализ полученного результата подтверждает его соответствие логическим условиям функционирования рассматриваемой системы с сетевой структурой, что является свидетельством **адекватности** разработанных правил как физической сущности моделируемого процесса, так и задаче его детерминированного сетевого моделирования.

Разработанные правила представления графов сетей с помощью графического аппарата сетевых схем функциональной целостности и методики записи результатов сетевого моделирования с помощью сетевых функций алгебры логики позволяют теперь приступить к разработке специальной процедуры решения систем логических уравнений, представляющих сетевую СФЦ, на основе установленного режима (критерия) функционирования потоковой сети для определения соответствующей сетевой ФАЛ.

2.2 Разработка основной процедуры СГМ для определения сетевых функций алгебры логики

Данная процедура является основой СГМ. Она предназначена для математически строгого решения систем логических уравнений, представляющих сетевые СФЦ, по заданному логическому критерию функционирования системы и определения соответствующей монотонной сетевой функции алгебры логики, в которой корректно учитываются последовательности и параллельности элементарных событий/работ. Разработка данной процедуры осуществлялась путем целенаправленной адаптации к задачам сетевого моделирования используемого в ОЛВМ Универсального графоаналитического метода (УГМ) [7, 9 С. 124-131] построения комбинаторных ФАЛ.

2.2.1 Основная процедура сетевого графоаналитического метода

Исходными данными для СГМ определения детерминированных последовательностей событий являются: система логических уравнений (2.1), (2.2), представляющая соответствующий граф *G(X, Y)* сетевой СФЦ, и логический критерий функционирования (ЛКФ), определяющий режим работы системы с сетевой структурой

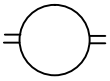
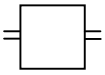
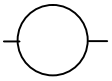
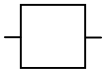
$$Yc \in f(\{y_i\}, i \in 1,2,...,N). \qquad (2.13)$$

В разрабатываемой процедуре решение систем логических уравнений, представляющих сетевые СФЦ, выполняется способом обратного поиска в глубину путем построения последовательности столбцов дерева решений (ДР). При построении и преобразовании столбцов ДР используются специальные символы и обозначения, которые приведены в таблице 2.1 [9, С.126].

Дерево решений сетевой системы логических уравнений, соответствующих сетевой СФЦ, представляет собой последовательность столбцов, каждый из которых определяет одну сетевую конъюнкцию. Сетевая конъюнкция может

состоять из одной или нескольких конъюнктивных последовательных групп логических переменных (2.7).

Таблица 2.1 – Символы дерева решений сетевого графоаналитического метода

№ п/п	Графическое обозначение	Описание узлов дерева решений системы логических уравнений
1	***i***	**Исходный узел.** Представляет в дереве решений установленную в формируемый столбец, но не принятую к раскрытию интегративную функцию
2		**Раскрываемый действительный узел.** Представляет принятую к раскрытию интегративную функцию y_i функциональной вершины ***i*** СФЦ и обозначает реализацию соответствующего собственного бинарного события
3		**Раскрываемый условный узел.** Представляет принятую к раскрытию интегративную функцию y_i фиктивной вершины ***i*** СФЦ или начальный этап раскрытия инверсной выходной функции функциональной вершины
4		**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		**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		**Раскрытый по обеспечению действительный узел.** Представляет функциональную вершину СФЦ, условие обеспечения которой реализовано в нижестоящей части формируемого столбца дерева решений
7		**Раскрытый по обеспечению условный узел.** Представляет фиктивную вершину СФЦ, условие обеспечения которой реализовано в нижестоящей части формируемого столбца дерева решений
8		**Смещенный узел.** Обозначает перенос исходного узла ***i*** в нижестоящую позицию столбца дерева решений для последующего раскрытия

Назначение символов, указанных в таблице 2.1, заключается в точном и однозначном представлении в столбцах ДР различных уровней раскрытия интегративных функций системы логических уравнений сетевой СФЦ. Все раскрытые столбцы дерева решений определяют дизъюнктивную нормальную форму полной сетевой логической функции, соответствующей структуре и критерию функционирования моделируемой системы с сетевой структурой.

Главный принцип, положенный в основу процедуры СГМ, состоит в том, что математическое определение последовательностей событий осуществляется путем раскрытия на основе логических уравнений СФЦ всех интегративных функций y_i в порядке, обратном последовательности их записи в столбце дерева решений. В ручной интерпретации это означает, что узлы записываются в столбце дерева решений "сверху вниз", а раскрытие соответствующих интегративных функций, согласно логическим уравнениям, и считывание переменных в логические последовательности осуществляется "снизу вверх".

НАЧАЛО ПРОЦЕДУРЫ СГМ

Этап 1) Выбор конъюнкции из ЛКФ и запись ее в столбец дерева решений.

Выполняется проверка наличия в заданном логическом критерии функционирования (2.13) $Yc \in f(\{y_i\}, i \in 1,2,...,N)$, записанном в прямой дизъюнктивной нормальной форме, очередной не реализованной конъюнкции интегративных функций y_i. При этом возможны два исхода:

1 Если такая конъюнкция есть, то все ее интегративные функции y_i в виде исходных узлов i (см. таблица 2.1, п.1) переписываются в начало нового столбца дерева решений. В записи ЛКФ выбранная конъюнкция зачеркивается (удаляется). Управление передается этапу 2.

ЛКФ Столбец ДР

$Yc \in ...y_j...\cancel{y_k}$ ----► k

2 Если ни одной не реализованной (не удаленной) конъюнкции в записи ЛКФ нет, то решение системы логических уравнений завершено, управление передается завершающему этапу 9.

ЛКФ Столбец ДР

$Yc \in ...\cancel{y_j}...\cancel{y_k}$

Этап 2) Принятие нижнего исходного узла ДР к раскрытию.

а) если нижний исходный узел i столбца дерева решений соответствует головной функциональной вершине СФЦ, то он преобразуется в действительный раскрываемый (принятый к раскрытию) узел, т.е. обводится кружком (см. таблицу 2.1, п.2). Далее выполняется переход к этапу 6;

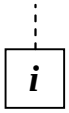
б) если нижний исходный узел i столбца дерева решений соответствует не головной функциональной вершине СФЦ (см. рисунок 2.1), то он преобразуется в действительный раскрываемый (принятый к раскрытию) узел, т.е. обводится кружком (см. таблицу 2.1, п.2). Далее выполняется переход к этапу 3 метода;

i

в) если нижний исходный узел i столбца дерева решений соответствует головной фиктивной вершине СФЦ, то он преобразуется в условный

раскрываемый (принятый к раскрытию) узел, т.е. обводится квадратом (см. таблицу 2.1, п.3). Далее выполняется этап 6;

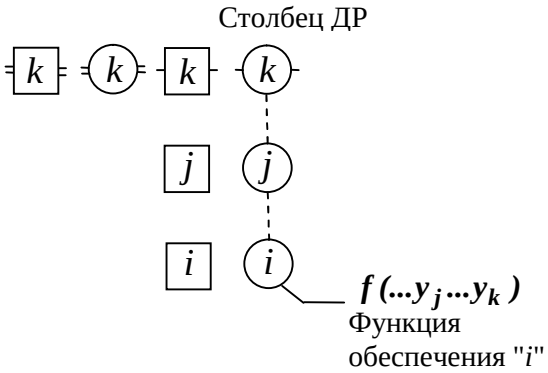
г) если нижний исходный узел ***i*** столбца дерева решений соответствует не головной фиктивной вершине СФЦ, то он преобразуется в условный раскрываемый (принятый к раскрытию) узел, т.е. обводится квадратом (см. таблицу 2.1, п.3). Далее выполняется этап 3 метода.



Таким образом, в формируемом дереве решений кружки представляют логические переменные элементов (ветвей) сетевой системы, а квадраты представляют узлы сети и логически являются константами (*true*).

Этап 3) Запись функции обеспечения (***ФО$_Б$***).

По номеру ***i*** конечного принятого к раскрытию действительного или условного узла формируемого столбца ДР из системы логических уравнений сетевой СФЦ выбирается уравнение y_i. Правая часть выбранного уравнения (без обозначения ***xi*** для действительного ***i***) в дизъюнктивной нормальной форме переносится (записывается) на ответвлении узла ***i*** формируемого столбца дерева решений. Эта запись далее является функцией обеспечения (***ФО$_Б$***) раскрытия столбца ДР на уровне узла ***i***. Затем выполняется переход к этапу 4 данного метода.



На рисунке слева от столбца приведены возможные варианты узлов ДР.

Этап 4) Проверка ФО$_Б$ на цикличность и раскрытость.

На рисунке 2.4 приведена схема условий возникновения ситуаций "Раскрытость" и "Цикл" при построении ДР и правила их преобразования.

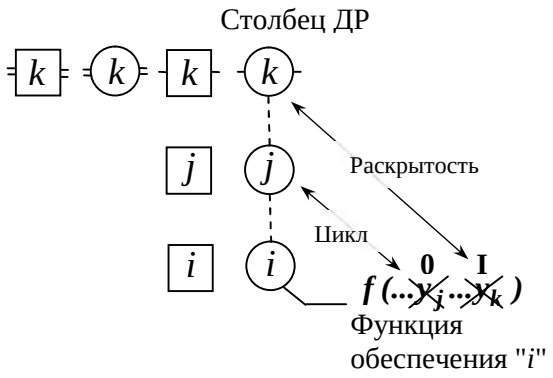


Рисунок 2.4 – Правила преобразования циклов и раскрытостей в СГМ

Признаком цикла или раскрытости является совпадение номеров узлов ***j, k*** в вышестоящей части столбца дерева решений и индексов ***j***, ***k*** узлов интегративных функций y_j, y_k, входящих в состав $ФО_Б$ конечного узла ***i***:

а) Цикл имеет место, если прямой узел ***j*** столбца является раскрываемым (принят к раскрытию). Этот узел может быть как действительным, так и условным. В обоих случаях прямая циклическая интегративная функция y_j в $ФО_Б$ не может быть реализована, т.е. является ложной и должна быть заменена логическим нулем (***false***).

б) Раскрытость имеет место, если вышестоящий прямой узел ***k*** столбца (действительный или условный) является либо собственно раскрытым, либо раскрытым по обеспечению (см. таблицу 2.1, п.4-7). В этом случае интегративная функция y_k в формируемом столбце уже реализована и в $ФО_Б$ должна быть заменена логической единицей (***true***).

После проверки и преобразования всех интегративных функций $ФО_Б$ по циклам и раскрытостям могут иметь место следующие три возможных исхода:

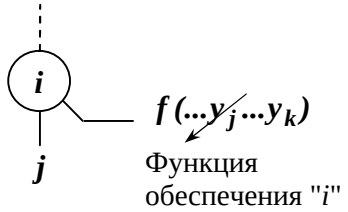
а) Вся $ФО_Б$ стала равной логическому нулю. Тогда дальнейшее построение данного столбца ДР невозможно, и управление передается ***этапу 8*** для поиска ответвлений в текущем столбце ДР и преобразования его в следующий столбец.

б) Вся $ФО_Б$ стала равной логической единице. Тогда конечный раскрываемый узел в столбце уже обеспечен и далее выполняется ***этап 6*** (преобразование узла в собственно раскрытый).

в) В $ФО_Б$ осталась хотя бы одна интегративная функция. Тогда управление передается ***этапу 5*** данного метода.

Этап 5) Запись конъюнкции из $\boldsymbol{ФО_Б}$ в столбец дерева решений.

Из $\boldsymbol{ФО_Б}$ выбирается одна (допустим, первая слева) конъюнкция интегративных функций $\boldsymbol{y_j}$, которая в виде последовательности исходных узлов ***j*** (см. таблицу 2.1, п.1) записывается в конец данного столбца дерева решений. Из $\boldsymbol{ФО_Б}$ выбранная конъюнкция исключается (зачеркивается стрелкой). Далее управление передается ***этапу 2*** (главный цикл СГМ).



Этап 6) Преобразование узла в собственно раскрытый и запись сетевых функций алгебры логики.

Осуществляется перевод конечного раскрываемого действительного или условного узла в разряд собственно раскрытых узлов, то есть он отмечается двумя черточками (см. таблицу 2.1, п. 4, 5). Затем выполняется процедура преобразования данного столбца по конечному собственно раскрытому узлу, начало записи новой последовательной конъюнктивной группы данной сетевой конъюнкции и дополнение новыми общими переменными предыдущих последовательных конъюнктивных групп, входящих (отдельными строками) в сетевую конъюнкцию данного столбца дерева решений.

Каждый собственно раскрытый узел позволяет реализовать условия раскрытия части или всех интегративных функций, представленных в столбце вышестоящими действительными или условными раскрываемыми узлами. Процедура преобразования узлов данного столбца выполняется последовательно снизу вверх по следующим правилам:

а) Собственно раскрытые, раскрытые по обеспечению и смещенные узлы пропускаются без изменений. Если просмотрены все элементы вышестоящей части столбца дерева решений, то обработка прекращается.

б) Принятые к раскрытию (раскрываемые) действительные и условные узлы переводятся в разряд раскрытых по обеспечению, то есть помечаются одной черточкой (см. таблицу 1.1. п.6, 7). При этом логическая переменная x_i,

соответствующая каждому очередному снизу раскрываемому действительному узлу, записывается через "точку" или "стрелку" в правые части всех нижестоящих записей конъюнктивных групп последовательностей данного столбца ДР.

в) Первый встреченный исходный узел переписывается в конец дерева решений. Сам встреченный исходный узел переводится в разряд смещенных, то есть перечеркивается угловой стрелкой (см. таблицу 2.1, п.8). После этого просмотр столбца прекращается. В результате такого преобразования столбца дерева решений может быть два исхода:

1) Выполнено смещение, т.е. преобразован не весь столбец ДР, а в конце столбца установлен новый исходный узел. Тогда управление передается ***этапу 2*** данной процедуры.

2) Преобразован весь столбец, т.е. не выполнено ни одного смещения. Это означает, что построение данного столбца дерева решений завершено, очередная последовательная конъюнкция сетевой ФРС сформирована. Тогда управление передается ***этапу 7*** данного метода.

Этап 7) Записи результатов логического моделирования данного столбца.

Все последовательные конъюнктивные группы, сформированные в процессе построения столбца ДР, переписываются в одну очередную **сетевую конъюнкцию**, входящую в состав общей сетевой логической функции.

Записывается очередная **комбинаторная конъюнкция** обычной логической ФРС системы, которая включает в себя простые логические переменные всех раскрытых действительных узлов сформированного столбца дерева решений.

Таким образом, результатами построения и раскрытия текущего столбца дерева решений являются две формы (сетевая и комбинаторная) аналитического представления очередной конъюнкции ФРС:

а) Сетевая форма конъюнкции, которая может состоять из одной или нескольких параллельных конъюнктивных последовательных групп логических переменных. Эта форма конъюнкции включается в состав общей сетевой функции алгебры логики.

б) Комбинаторная форма конъюнкции, в которую входят (без учета

последовательностей) логические переменные, соответствующие действительным собственно раскрытым или раскрытым по обеспечению узлам сформированного столбца дерева решений. Эта форма конъюнкции включается в состав комбинаторной функции алгебры логики.

Эти две формы конъюнкций сохраняются отдельно в сводных результатах логического моделирования. Далее выполняется ***этап 8***.

Этап 8) Поиск ответвления и формирование нового столбца дерева решений.

Выполняется поиск в данном столбце первого снизу действующего ответвления. Ответвлением является первый снизу узел, у которого в $\boldsymbol{ФО_Б}$ есть хотя бы одна не смещенная интегративная функция. В результате выполнения поиска ответвлений возможны два исхода:

I Ответвление найдено. Тогда выполняется удаление всех нижестоящих от найденного ответвления узлов столбца дерева решений. При удалении каждого нижестоящего узла вышестоящая (относительно ответвления) часть столбца соответствующим образом преобразуется, снижая уровень раскрытия его элементов. Такое преобразование называется восстановлением неопределенности и включает в себя следующие основные действия:

а) при отбрасывании раскрываемого узла следует проверить наличие в вышестоящей части столбца соответствующего смещенного узла, и если он есть, убрать знак смещения;

б) если отбрасывается собственно раскрытый узел, то в вышестоящей части все раскрытые по обеспечению узлы переводятся в разряд раскрываемых (черточка удаляется); это выполняется до тех пор, пока в процессе просмотра снизу вверх не встретится следующий собственно раскрытый узел.

После преобразования узел ответвления и вся преобразованная вышестоящая часть столбца вместе с оставшимися ответвлениями переписываются в новый столбец дерева решений, управление передается ***этапу 5*** данного метода.

II Не найдено ни одного действующего ответвления, а в исходной ЛКФ есть еще хотя бы одна не преобразованная конъюнкция. Тогда управление передается ***этапу 1*** данного метода.

Этап 9) Завершающие формальные преобразования полученных сетевых ФРС.

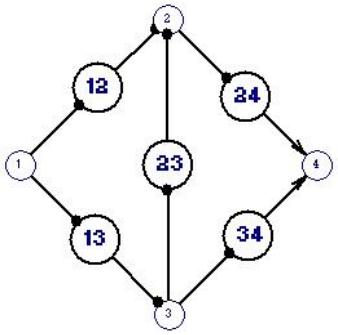
Если в СФЦ были размноженные вершины, то в полученных логических функциях их схемные номера заменяются системными номерами. Полученные логические функции минимизируются и приводятся к виду, удобному для их дальнейшего применения.

КОНЕЦ ПРОЦЕДУРЫ СГМ

Разработанная процедура СГМ является новым, математически строгим способом сетевого решения систем логических уравнений, представляющих монотонные сетевые СФЦ.

2.2.2 Методика применения СГМ последовательностей событий

Разработанные методические положения решения с помощью разработанного СГМ систем логических уравнений сетевой СФЦ иллюстрируются развернутым демонстрационным примером определения новых сетевых и традиционных комбинаторных функций алгебры логики на основе смешанной сетевой СФЦ, изображенной на рисунке 2.3.d. Эта СФЦ аналитически представляется следующей системой из девяти логических уравнений

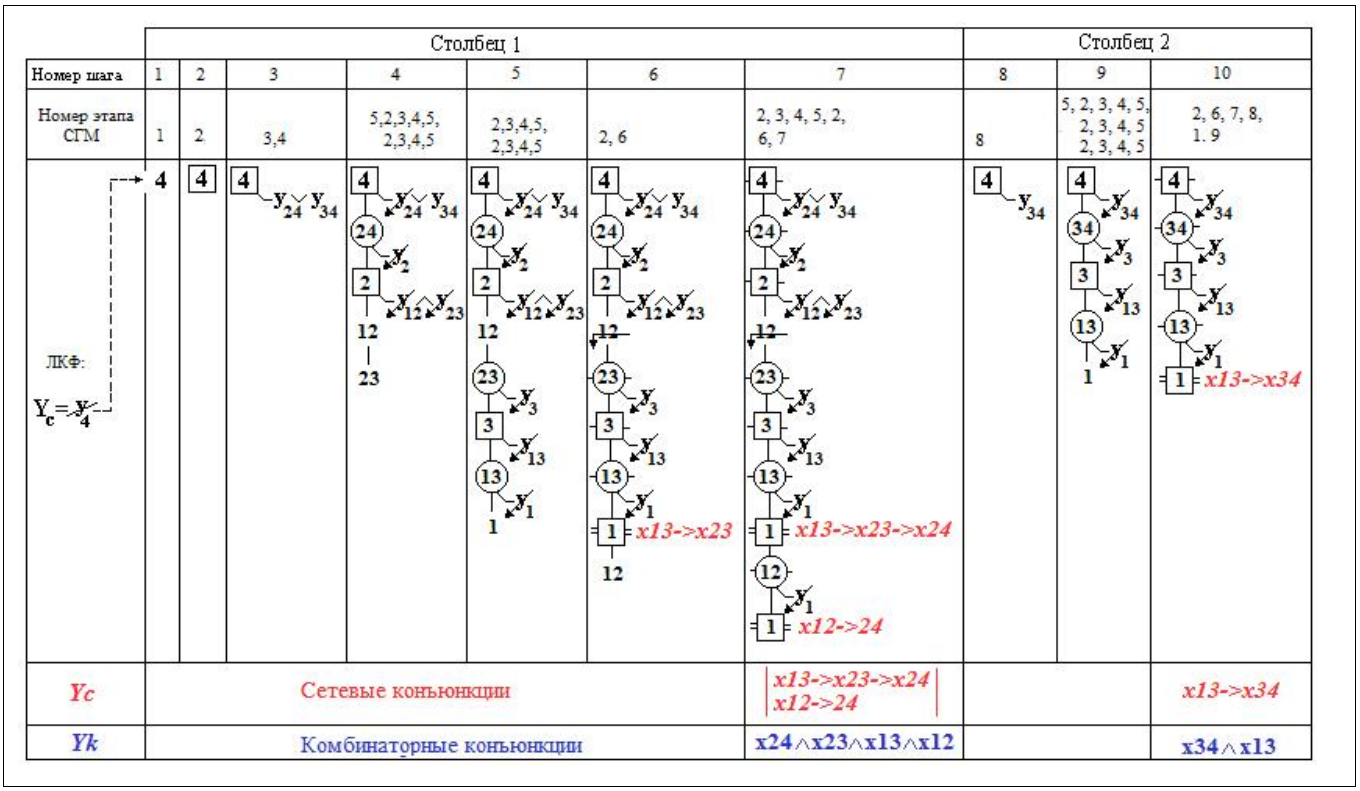


$$
\begin{array}{ll}
1) & y_1 \ \mathrm{Z}\ \mathit{true} \\
2) & y_2 \ \mathrm{Z}\ y_{12} \ \dot{e}\ y_{23} \\
3) & y_3 \ \mathrm{Z}\ y_{13} \\
4) & y_4 \ \mathrm{Z}\ y_{24} \ \text{Ę}\ y_{34} \\
5) & y_{12} \ \mathrm{Z}\ x_{12} \ \dot{e}\ y1 \\
6) & y_{13} \ \mathrm{Z}\ x_{13} \ \dot{e}\ y_1 \\
7) & y_{23} \ \mathrm{Z}\ x_{23} \ \dot{e}\ y_3 \\
8) & y_{24} \ \mathrm{Z}\ x_{24} \ \dot{e}\ y_2 \\
9) & y_{34} \ \mathrm{Z}\ x_{34} \ \dot{e}\ y_3
\end{array}
\qquad (2.14)
$$

В таблице 2.2 приведены результаты развернутой пошаговой методики применения разработанного СГМ для решения задачи определения новой сетевой и традиционной комбинаторной ФАЛ на основе логического критерия функционирования

$$\boldsymbol{Yc} \ \mathrm{Z}\ y_4 \,. \qquad (2.15)$$

Таблица 2.2 – Развернутое дерево СГМ решения системы логических уравнений



На шаге 1 выполняются действия ***этапа 1*** разработанной процедуры СГМ, согласно которым из заданного ЛКФ ***Yc*** Z y_4 в начало очередного столбца ДР записывается исходный узел 4 (см таблицу 2.1).

На шаге 2 выполняются действия ***этапа 2*** СГМ – принятие к раскрытию не головного условного узла 4 (обводится квадратом).

На шаге 3 выполняются действия ***этапов 3*** и ***4*** СГМ. В результате выполнения ***этапа 3*** СГМ правая часть уравнения (2.14.4) записывается в качестве функции обеспечения принятого к раскрытию условного узла 4 формируемого столбца ДР.

Затем, на ***этапе 4*** СГМ, выполняется ее проверка на цикличность и раскрытость.

На шаге 4 последовательно выполняются действия ***этапов 5, 2, 3, 4, 5*** СГМ. В результате одна дизъюнктивная составляющая y_{24} $ФО_Б$ узла 4 переносится в конец ДР виде действительного узла 24 (***этап 5***), который принимается к раскрытию как не головной действительный узел (***этап 2***).

Далее (***этап 3***) из уравнения (2.14.8) считывается и записывается на ответвлении узла 24 его $\boldsymbol{ФО_Б\ y_2}$, которая затем проверяется на цикличность и раскрытость (***этап 4***) и переносится в ДО в виде исходного узла 2 (***этап 5***).

Затем выполняются ***этапы 2 и 3***, в результате чего исходный узел 2 принимается к раскрытию (обводится квадратом). Из уравнения 2.14.2 ему приписывается $\boldsymbol{ФО_Б\ \ y_{12}}$ ė $\boldsymbol{y_{23}}$, которая затем проверяется (***этап 4***) и записывается в виде двух последовательных исходных узлов 12 и 23 в нижнюю часть формируемого столбца ДР (***этап 5***).

На ***этапе 5*** к раскрытию принимается один конечный исходный узел 23 (***этап 2***). Далее последовательно выполняются действия ***этапов 3, 4, 5, 2, 3, 4, 5*** над вершинами 23, 3 и 13 (подобные предыдущему шагу), в результате чего в формируемом столбце конечным исходным становится головной условный узел 1 (исток сети).

На ***этапе 6*** сначала выполняются действия ***этапа 2***, в результате которых конечный исходный узел 1 преобразуется в условный раскрываемый узел (обводится квадратом), и управление передается ***этапу 6*** СГМ. На ***этапе 6*** осуществляются следующие преобразования столбца ДР:

– условный раскрываемый узел 1 переводится в разряд собственно раскрытого условного узла (две черточки);

– вышестоящие узлы 13, 3 и 23 последовательно переводятся в разряд раскрытых по обеспечению (одна черточка);

– исходный узел 12 смещается в нижнюю часть данного столбца ДР;

– в ходе указанных действий на основе номеров последовательно раскрываемых (снизу вверх) действительных узлов 13, 23 на уровне собственно раскрытого узла 1 формируется запись последовательной (слева направо) конъюнктивной группы элементарных событий/работ: $\boldsymbol{x_{13}}$ ì $\boldsymbol{x_{23}}$.

На ***этапе 7*** к раскрытию принимается смещенный исходный узел 12. В результате выполнения действий ***этапов 2, 3, 4, 5, 2*** конечным принятым к раскрытию снова становится головной условный узел 1 (исток сети), и

управление передается ***этапу 6*** СГМ, в котором осуществляются следующие преобразования данного столбца формируемого ДР:

– условный раскрываемый узел 1 переводится в разряд собственно раскрытого условного узла (две черточки);

– вышестоящий принятый к раскрытию действительный узел 12 переводится в разряд раскрытых по обеспечению (одна черточка), а на уровне нижней собственно раскрытой условной вершины 1 записывается первая логическая переменная x_{12} новой (второй) конъюнктивной последовательной группы элементарных событий/работ;

– все вышестоящие ранее раскрытые и смещенные узлы 1, 13, 3, 23, 12 пропускаются;

– ранее не раскрытые узлы 2, 24 и 4 последовательно (снизу вверх) переводятся в разряд раскрытых по обеспечению (одна черточка), а логическая переменная x_{24} (действительного узла 24) записывается справа в обе нижестоящие конъюнктивные последовательные группы: x_{13} ì x_{23} ì x_{24} и x_{12} ì x_{24}.

Поскольку на данном шаге просмотрены (снизу вверх) все узлы столбца (до верхнего узла 4 включительно), то данный первый столбец дерева решений построен полностью.

Далее выполняется ***этап 7*** СГМ, в котором результаты сетевого и комбинаторного логического моделирования одной конъюнкции сохраняются отдельно в нижних строках таблицы 2.2 сводных результатов логического моделирования:

$$\textbf{\textit{Сетевая конъюнкция :}}\quad \begin{vmatrix} x_{13} \text{ ė } x_{23} \text{ ė } x_{24} \\ x_{12} \text{ ė } x_{24} \end{vmatrix} \text{ Z } \begin{vmatrix} x_{13} \text{ ì } x_{23} \text{ ì } x_{24} \\ x_{12} \text{ ì } x_{24} \end{vmatrix} \qquad (2.16)$$

$$\textbf{\textit{Комбинатор ная конъюнкция :}}\quad x_{24} \text{ ė } x_{23} \text{ ė } x_{13} \text{ ė } x_{12} \qquad (2.17)$$

На ***этапе 8*** построенный столбец дерева решений проверяется и преобразуется на предмет поиска первого снизу нераскрытого ответвления в $ФО_Б$. В данном столбце одно такое нераскрытое ответвление y_{34} есть в $ФО_Б$ узла 4. Поэтому при формировании начала следующего столбца ДР все нижестоящие узлы данного (предыдущего) столбца удаляются, а узел 4 переводится в разряд

нераскрытых условных узлов (обведен квадратом), у которого на ответвлении записана нераскрытая $\boldsymbol{ФО_Б\, y_{34}}$.

На ***этапе 9*** осуществляется построение (сверху вниз) и раскрытие узлов 34, 3 и 13 второго столбца ДР до появления головного условного исходного узла 1 (исток сети).

На завершающем ***этапе 10*** узел 1 принимается к раскрытию (***этап 2*** СГМ), переводится в разряд собственно раскрытого условного узла (две черточки), после чего последовательно (снизу вверх) раскрываются по обеспечению (одна черточка) все вышестоящие узлы 13, 3, 34 и 4 (***этап 6***). В ходе этого процесса формируется запись еще одной конъюнкции сетевой ФАЛ, состоящей из одной последовательной конъюнктивной группы $\boldsymbol{x_{13}}$ ì $\boldsymbol{x_{34}}$ и комбинаторной конъюнкции $\boldsymbol{x_{34}}$ ė $\boldsymbol{x_{13}}$ (***этапы 6*** и ***7*** СГМ).

Поскольку в данном, втором столбце ДР отсутствуют нераскрытые ответвления, то построение логических моделей завершено и выполняются заключительные действия ***этапов 8***, ***1*** и ***9*** СГМ.

Таким образом, в таблице 2.2 с помощью СГМ выполнено решение системы логических уравнений (2.14) по критерию (2.15) и получены сетевая (2.18) и комбинаторная (2.19) логические функции

$$\boldsymbol{Yc}\ Z \left| \begin{matrix} \boldsymbol{x_{13}}\ ė\ \boldsymbol{x_{23}}\ ė\ \boldsymbol{x_{24}} \\ \boldsymbol{x_{12}}\ ė\ \boldsymbol{x_{24}} \end{matrix} \right| Ę\ \boldsymbol{x_{13}}\ ė\ \boldsymbol{x_{34}}\ Z \left| \begin{matrix} \boldsymbol{x_{13}}\ ì\ \boldsymbol{x_{23}}\ ì\ \boldsymbol{x_{24}} \\ \boldsymbol{x_{12}}\ ì\ \boldsymbol{x_{24}} \end{matrix} \right| Ę\ \boldsymbol{x_{13}}\ ì\ \boldsymbol{x_{34}} \qquad (2.18)$$

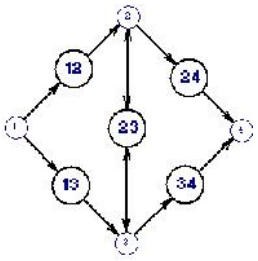
$$\boldsymbol{Yк}\ Z\ \boldsymbol{x_{24}}\ ė\ \boldsymbol{x_{23}}\ ė\ \boldsymbol{x_{13}}\ ė\ \boldsymbol{x_{12}}\ Ę\ \boldsymbol{x_{34}}\ ė\ \boldsymbol{x_{13}} \qquad (2.19)$$

Корректность результата (2.18) построения с помощью СГМ сетевой ФАЛ подтверждается ее совпадением с тестовым результатом (2.12), определенным в ходе постановки данной задачи.

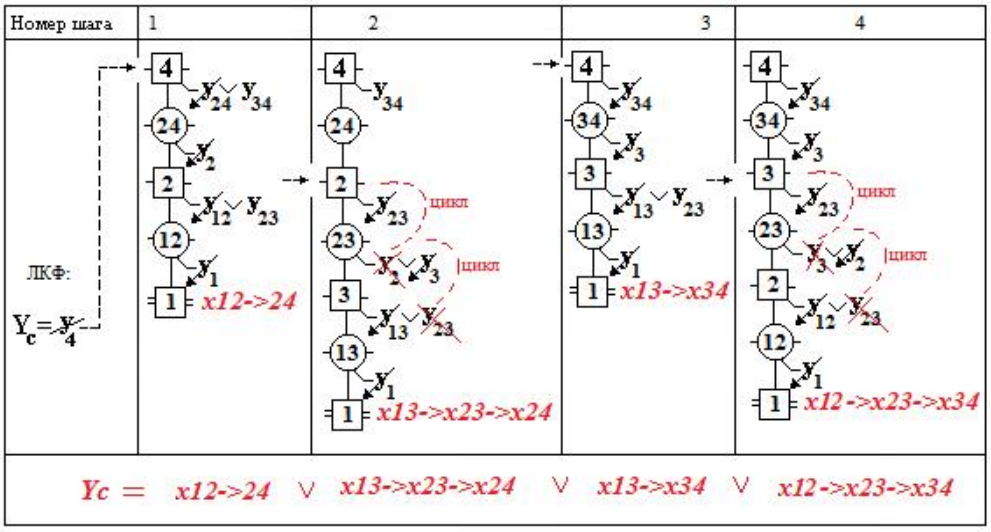
При практическом ручном применении СГМ в процессе построения ДР все шаги реализуются при построения каждого очередного столбца. Это сокращает общие размеры ДР систем логических уравнений. Так, для рассмотренного выше примера будут построены только два столбца ДР, которые в таблице 2.2 представлены шагами 7 и 10 соответственно.

В таблице 2.3 приведены результаты применения СГМ для нахождения сетевой ФАЛ на основе дизъюнктивной СФЦ, изображенной на рисунке 2.3.b.

Таблица 2.3 – Определение сетевой логической функции на основе дизъюнктивной СФЦ сети

Дизъюнктивная СФЦ сети	**Система логических уравнений**
	y_1 Z *true* y_2 Z y_{12} Ę y_{23} y_3 Z y_{13} Ę y_{23} y_4 Z y_{24} Ę y_{34} y_{12} Z x_{12} ė y_1 y_{13} Z x_{13} ė y_1 y_{23} Z x_{23} ė (y_3 Ę y_2) y_{24} Z x_{24} ė y_2 y_{34} Z x_{34} ė y_3

Дерево решений системы логических уравнений СГМ



Полученный с помощью СГМ результат

$$Yc \text{ Z } x_{12} \text{ ì } x_{24} \text{ Ę } x_{13} \text{ ì } x_{23} \text{ ì } x_{24} \text{ Ę } x_{13} \text{ ì } x_{34} \text{ Ę } x_{12} \text{ ì } x_{23} \text{ ì } x_{34}$$

совпадает с приведенным ранее тестовым результатом (2.10) решения этой задачи.

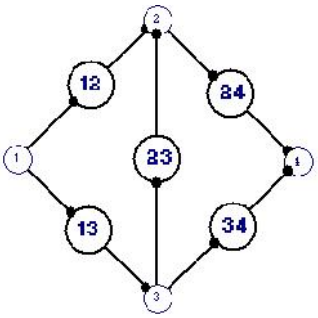
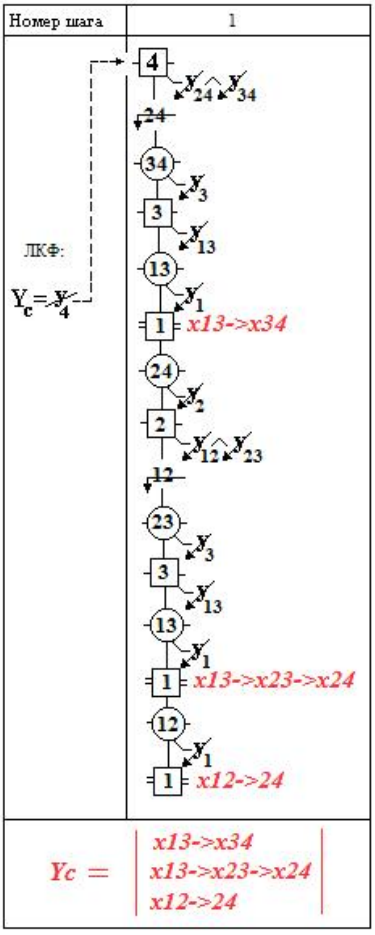
В таблице 2.4. приведены результаты применения СГМ для нахождения сетевой ФАЛ на основе конъюнктивной СФЦ, изображенной на рисунке 2.3.c.

Полученный с помощью СГМ результат

$$\left| \begin{matrix} x_{12} \text{ ì } x_{24} \\ x_{13} \text{ ì } x_{23} \text{ ì } x_{24} \\ x_{13} \text{ ì } x_{34} \end{matrix} \right|$$

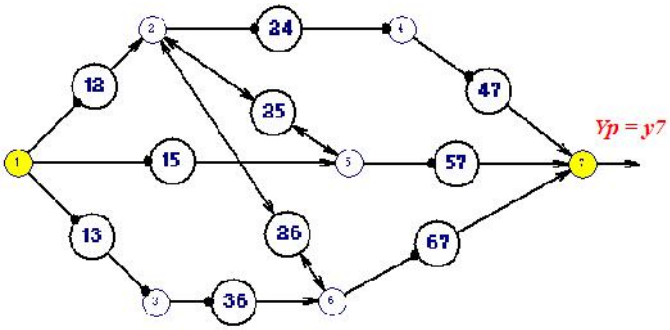
совпадает с приведенным ранее тестовым результатом (2.11) решения этой задачи.

Таблица 2.4 – Определение сетевой логической функции на основе конъюнктивной СФЦ сети

Конъюнктивная СФЦ сети	**Дерево решений системы логических уравнений СГМ**
	
Система логических уравнений $y1 = true$ $y2 = y12 \wedge y23$ $y3 = y13$ $y4 = y24 \wedge y34$ $y12 = x12 \wedge y1$ $y13 = x13 \wedge y1$ $y23 = x23 \wedge y3$ $y24 = x24 \wedge y2$ $y34 = x34 \wedge y3$	

Таким образом, представлено доказательство **корректности** выполненных процедурных преобразований.

В заключение данной главы представлен пример применения разработанного СГМ для сетевого логического моделирования процесса функционирования рассмотренного ранее фрагмента электрической сети (см. §1.1.2 рисунки 1.1 и 1.2), описанного в работе [33]. Дизъюнктивная сетевая СФЦ работоспособности электрической сети данного примера приведена на рисунке 1.5. Этой СФЦ соответствует система логических уравнений (2.20)



$$
\begin{aligned}
&y_1 = true\\
&y_2 = y_{12} \cdot y_{26} \cdot y_{25}\\
&y_3 = y_{13}\\
&y_4 = y_{24}\\
&y_5 = y_{15} \cdot y_{25}\\
&y_6 = y_{36} \cdot y_{26}\\
&y_7 = y_{47} \cdot y_{57} \cdot y_{67}\\
&y_{12} = x_{12} \cdot y_1\\
&y_{15} = x_{15} \cdot y_1\\
&y_{13} = x_{13} \cdot y_1\\
&y_{24} = x_{24} \cdot y_2\\
&y_{25} = x_{25} \cdot (y_2 \cdot y_5)\\
&y_{26} = x_{26} \cdot (y_2 \cdot y_6)\\
&y_{36} = x_{36} \cdot y_3\\
&y_{47} = x_{47} \cdot y_4\\
&y_{57} = x_{57} \cdot y_5\\
&y_{67} = x_{67} \cdot y_6
\end{aligned}
\qquad (2.20)
$$

На рисунке 2.5 приведено дерево решений, полученное с помощью разработанной процедуры СГМ на основе системы логических уравнений (2.20) и логического критерия работоспособности сети $\boldsymbol{Yc} = \boldsymbol{y_7}$.

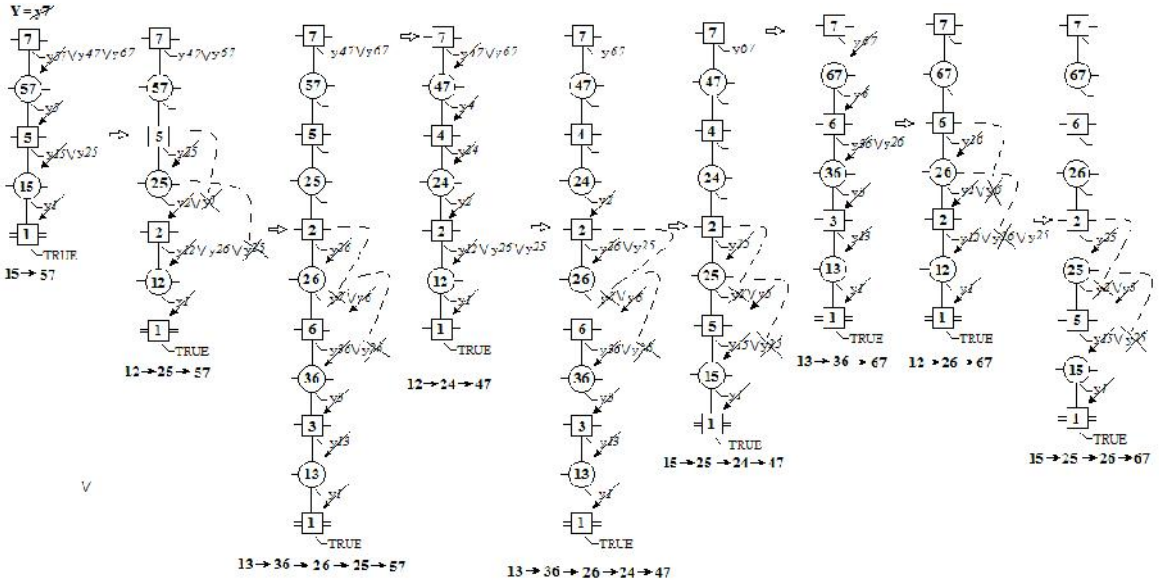


Рисунок 2.5 – Применение СГМ для определения отдельных логических последовательностей событий распределения мощности в ЭС

На рисунке 2.5 простые логические переменные в записях сформированных последовательных конъюнкций сетевой логической функции работоспособности системы представлены только номерами соответствующих элементарных событий/работ (без символа ***x***), а направления передачи мощности указаны с помощью стрелок. Всего в данной задаче с помощью СГМ определено девять детерминированных последовательностей событий, аналитически представленных сетевой ФАЛ (2.21)

$$
\begin{aligned}
Yc\ Z\ & x_{15}\ \grave{\imath}\ x_{57}\ Ę\ x_{12}\ \grave{\imath}\ x_{25}\ \grave{\imath}\ x_{57}\ Ę\ x_{13}\ \grave{\imath}\ x_{36}\ \grave{\imath}\ x_{26}\ \grave{\imath}\ x_{25}\ \grave{\imath}\ x_{57}\ Ę \\
& Ę\ x_{12}\ \grave{\imath}\ x_{24}\ \grave{\imath}\ x_{47}\ Ę\ x_{13}\ \grave{\imath}\ x_{36}\ \grave{\imath}\ x_{26}\ \grave{\imath}\ x_{24}\ \grave{\imath}\ x_{47}\ Ę \\
& Ę\ x_{15}\ \grave{\imath}\ x_{25}\ \grave{\imath}\ x_{24}\ \grave{\imath}\ x_{47}\ Ę\ x_{13}\ \grave{\imath}\ x_{36}\ \grave{\imath}\ x_{67}\ Ę\ x_{12}\ \grave{\imath}\ x_{26}\ \grave{\imath}\ x_{67}\ Ę \\
& Ę\ x_{15}\ \grave{\imath}\ x_{25}\ \grave{\imath}\ x_{26}\ \grave{\imath}\ x_{67}
\end{aligned}
\tag{2.21}
$$

Результат (2.21) совпадает с данными по решению этой задачи, приведенными в работе [33], что подтверждает корректность разработанного сетевого графоаналитического метода учета последовательностей событий.

2.3 Алгоритм и программная реализация сетевого графоаналитического метода последовательностей событий

Рассмотренные примеры показывают, что возможности ручного применения разработанной процедуры сетевого графоаналитического метода решения систем логических уравнений сетевых СФЦ существенно ограничены размерностями решаемых задач. Это не недостаток, а объективная закономерность практически всех существующих и разрабатываемых структурных методов моделирования систем (например, Марковского моделирования, сетевого планирования и управления, всех логико-вероятностных методов и др.). Поэтому широкое практическое применение СГМ математического моделирования последовательностей событий возможно только при доведении его теоретических положений до уровня, позволяющего создать соответствующие алгоритмы и программы автоматического сетевого графоаналитического моделирования.

Центральное место здесь занимает алгоритмизация разработанной процедуры СГМ решения систем логических уравнений сетевых СФЦ. Общий алгоритм СГМ, разработанный на основе процедуры СГМ (см. параграф 2.2.1), приведен на рисунке 2.6.

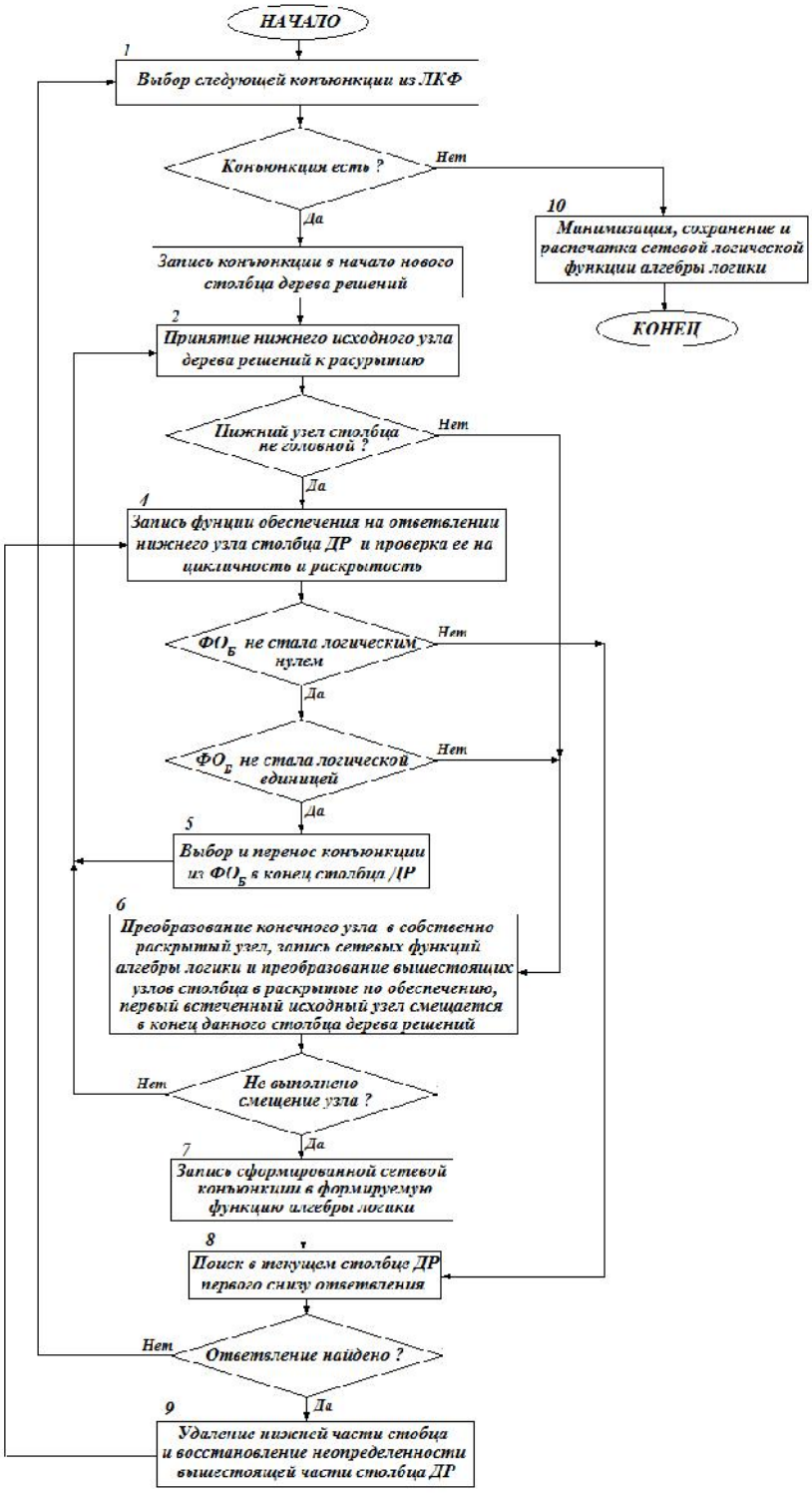


Рисунок 2.6 – Общий алгоритм СГМ определения сетевых логических функций

Необходимо отметить, что особенность данного класса алгоритмов и программ состоит в том, что первым и главным объектом автоматизации являются процессы построения аналитических математических моделей потоковых систем – сетевых функций алгебры логики. Вопросы применения этих аналитических моделей для расчетов показателей, безусловно, важны, но это

следующий (и существенно более простой) этап автоматизации процессов моделирования и расчетов показателей сложных и высокоразмерных сетевых системных объектов, рассматриваемый далее в главе 3.

Программный код реализации алгоритма СГМ (см. рисунок 2.6) разработан на языке программирования Borland Object Pascal, в среде Borland Delphi Professional, Version 7.0 (Build 4.453). Он внедрен в модуль LOG4 логического моделирования [20], который используется в программном комплексе "ПК АСМ ЛВДМ" [54, глава 4 диссертации] и обеспечивает реализацию нового специального режима "Метод ЛДМ ДПС". Программный код модуля LOG4 с реализованным алгоритмом СГМ установлен в "ПК АСМ ЛВДМ" и обеспечивает решение прежних комбинаторных задач логико-вероятностного и новых задач сетевого структурно-логического моделирования систем.

На рисунке 2.7 изображены основные рабочие окна "ПК АСМ ЛВДМ" с включенным режимом и результатами автоматизированного сетевого моделирования предыдущего примера электрической сети (см. (2.20) и рисунок 2.5).

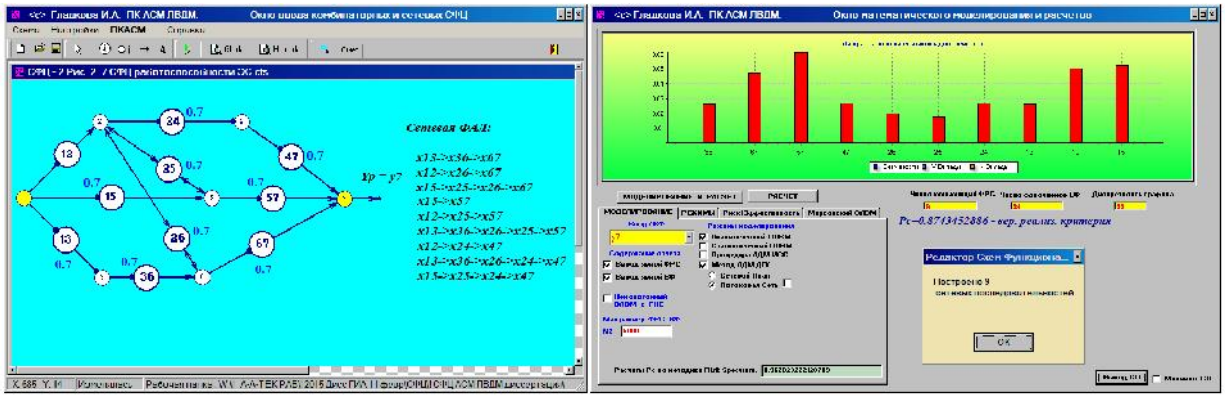


Рисунок 2.7 – Рабочие окна "ПК АСМ ЛВДМ" с включенным режимом сетевого структурно-логического моделирования

На рисунке 2.7 показано, что с помощью реализованного в комплексе "ПК АСМ ЛВДМ" алгоритма СГМ (см. рисунок 2.6) автоматически получены девять логических последовательностей событий, которые совпали с результатом (2.21), полученным с помощью ручной технологии применения разработанной процедуры СГМ решения систем логических уравнений сетевых СФЦ (см. рисунок 2.5).

Выводы по главе 2

При выполнении исследований, связанных с решением первой частной научной задачи диссертации, были разработаны все основные составляющие СГМ:

1 Общие правила и методика представления с помощью СФЦ исходных структурных моделей функционирования сложных систем с сетевой структурой.

2 Математически строгий аппарат аналитического представления моделей функционирования систем с сетевой структурой с помощью сетевых функций алгебры логики.

3 Основная процедура сетевого графоаналитического метода, предназначенная для математически строгого решения систем логических уравнений и определения на основе сетевых СФЦ и заданных логических критериев функционирования соответствующих монотонных сетевых функции алгебры логики, в которых корректно представляются достоверные последовательности, параллельности и циклические связи элементарных событий/работ сложных систем.

4 Алгоритм и программная реализация сетевого графоаналитического метода, которые позволяют автоматизировать процессы решения систем логических уравнений и построения сетевых детерминированных математических моделей функционирования сетевых системных объектов большой размерности и высокой структурной сложности.

Новизна результатов подтверждается отсутствием прототипа и аналогов решения задачи моделирования сложных систем с корректным учетом последовательностей, параллельностей и цикличностей связей элементарных событий/работ сложных систем с сетевой структурой.

3 Разработка методик структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой

Разработанный в предыдущем разделе сетевой графоаналитический метод структурно-логического моделирования последовательностей событий позволяет приступить к разработке методик выполнения расчетов показателей результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой и учета изменений их состояний.

В настоящем разделе изложены результаты разработки трех методик, алгоритмов и программ структурно-логического анализа:

– методики структурно-логического моделирования и расчета показателей систем сетевого планирования и управления [28-30];

– методики структурно-логического моделирования и расчета показателей распределения потоков в сетях (электрических сетях [31-33], систем водоснабжения и водоотведения [34, 35]);

– методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы.

3.1 Разработка методики структурно-логического моделирования и расчета показателей сетевых планов выполнения работ

В настоящее время системы сетевого планирования и управления (СПУ) являются средством научно обоснованной организации работ в различных областях промышленного производства и строительства [29, с.4] и военных организационно-функциональных систем [9, С. 196, 212]. Основу СПУ составляет сетевая графическая модель плана выполнения работ, в качестве которой традиционно используются сетевые графики (СГ) двух видов [28, с. 5]:

1 СГ на языке **работ**, в которых работы сетевого плана изображаются кружками, а события (переходы) – стрелками;

2 СГ на языке **событий**, в которых работы сетевого плана изображаются стрелками, а события – кружками (прямоугольниками, овалами квадратами).

Поэтому на **первом этапе** создания формализованной методики структурно-логического моделирования и расчета показателей систем СПУ необходимо разработать дополнительные специальные правила представления различных видов СГ с помощью графического аппарата сетевых СФЦ (см. §3.1.1). Это позволит на **втором этапе** (см. §3.1.2) методики анализа систем СПУ с помощью разработанного ранее СГМ последовательностей событий (см. главу 2) формировать вручную (см. §2.2) или автоматически (см. §2.3) соответствующие аналитические модели сетевых планов работ в форме сетевых ФАЛ $\boldsymbol{Y_C}$, состоящих из $\boldsymbol{K}$ конъюнктивных групп $\boldsymbol{Lk} \in \boldsymbol{Yc}$, $k = 1, 2, \ldots, K$ последовательностей работ.

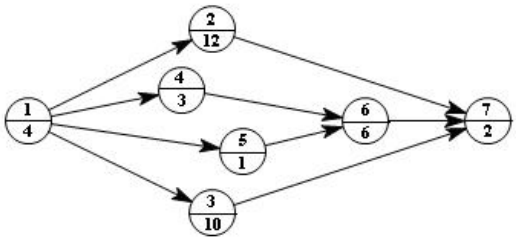
Основными исходными числовыми параметрами СГ являются продолжительности (длительности) $\boldsymbol{t_i}$ отдельных работ $\boldsymbol{x_i}$, $\boldsymbol{i}$ = 1,2, …, H [29, с. 21] сетевого плана.

На **третьем этапе** разрабатываемой методики анализа систем СПУ на основе построенных сетевых логических моделей $\boldsymbol{Yc}$ и заданных параметров $\boldsymbol{t_i}$ продолжительности (длительности) отдельных работ $\boldsymbol{x_i}$, $\boldsymbol{i}$ = 1,2, …, H [29, с. 21] должны вычисляться две группы основных детерминированных показателей результативности сетевых планов [29, с. 21-28], [30, с. 20-25]. Группу 1 составляют показатели **путей**, а группу 2 – показатели **работ** сетевых планов.

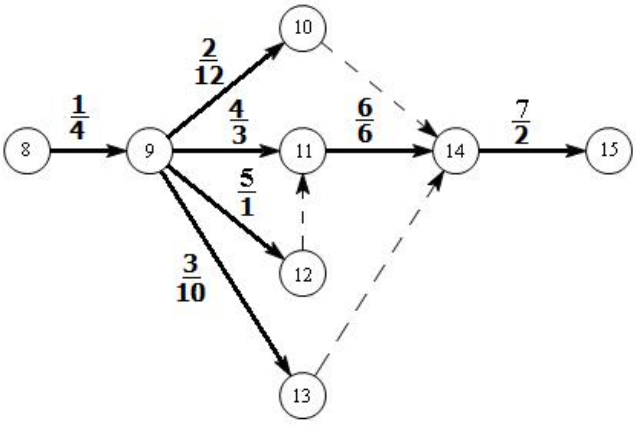
3.1.1 Правила представления сетевых графиков работ с помощью СФЦ

На рисунке 3.1 приведены примеры двух указанных выше способов графического представления одного и того же сетевого плана работ [29, с. 22], используемые в типовых методиках сетевого планирования и управления.

На СГ работ, изображенном на рисунке 3.1.а, вершинами обозначены работы сетевого плана. В числителе дробного номера вершин указан номер работы, а в знаменателе – продолжительность этой работы. Стрелками на этом графе обозначены события допустимых переходов сетевого плана.



а)
Сетевой график работ



б)
Сетевой график событий

Рисунок 3.1 – Типовые формы схем сетевых графиков работ и событий

На СГ событий, изображенном на рисунке 3.1.б, непрерывными стрелками обозначены фактические работы того же сетевого плана. Рядом со стрелками записаны дроби, в которых в числителе указаны номера работ, а в знаменателе – заданные значения их продолжительностей. Пунктирными стрелками на этом рисунке обозначены, так называемые, фиктивные работы, продолжительность которых равна нулю. Вершинами в этой форме СГ представляются события реализации групп всех предшествующих работ сетевого плана. Событие с номером 15 на рисунке 3.1.б представляет реализацию всего сетевого плана данного примера.

Корректное представление рассмотренных типовых видов сетевых планов графическими и логическими средствами аппарата СФЦ является обязательным условием возможности применения разработанного СГМ последовательностей событий для решения задач моделирования и расчетов показателей результативности в области сетевого планирования и управления. Проведенное исследование данного вопроса показало, что графических и логических средств аппарата сетевых СФЦ достаточно для корректного представления всех типовых видов сетевых графиков систем PERT и GERT сетевого планирования и управления. Разрабатываемые правила должны позволять представлять с помощью сетевых СФЦ оба указанные вида типовых графиков сетевых планов работ.

Правила представления с помощью СФЦ сетевых планов работ:

1 Все действительные работы $\boldsymbol{x_i}$, $\boldsymbol{i} = 1,2, \ldots, H$ сетевого плана представляются в СФЦ функциональными вершинами с номерами $\boldsymbol{i}$ и параметрами $\boldsymbol{t_i}$, равными их

заданной продолжительности. Это обусловлено тем, что в ОЛВМ и графическом аппарате сетевых СФЦ ребра используются только для представления заданных последовательностей событий и их логических отношений. Поэтому сопоставление ребрам СФЦ работ сетевых планов не представляется возможным.

В рассматриваемых примерах (см. рисунок 3.1) для представления с помощью СФЦ работ, указанных в обоих видах сетевых графиков, необходимо и достаточно выделить семь функциональных вершин с номерами/параметрами, равными

$$\boldsymbol{i / t_i \in 1/4,\ 2/12,\ 3/10,\ 4/3,\ 5/1,\ 6/6,\ 7/2}. \qquad (3.1)$$

Таким образом, и в СФЦ, представляющих сетевые графики работ (см. рисунок 3.1.а), и в СФЦ, представляющих сетевые графики событий (см. рисунок 3.1.б), все действительные работы представляются только функциональными вершинами.

2 Все используемые в сетевых планах фиктивные работы имеют нулевую продолжительность. Функционально фиктивные работы сетевых планов можно разделить на два вида:

– *действительные фиктивные работы* входят в состав отдельных путей сетевого плана. В сетевых СФЦ эти действительные фиктивные работы представляются с помощью конъюнктивных дуг;

– *условные фиктивные работы* не входят в состав отдельных путей сетевого плана, а используются для представления только действующих условий временной зависимости окончания работ одного пути на начало работ в другом пути сетевого плана. В сетевых СФЦ эти условные фиктивные работы представляются с помощью специально выделенных функциональных вершин с нулевыми значениями параметров их протяженности. В настоящей работе принято, что эти функциональные вершины должны в соответствующих сетевых СФЦ иметь номера от **801** до **899** включительно.

В рассматриваемом примере все три фиктивные работы, указанные на рисунке 3.1.б, являются действительными. Поэтому при построении соответствующей сетевой СФЦ они представляются простыми конъюнктивными дугами.

3 Вершины, используемые в сетевых графиках событий (см. рисунок 3.1.б), не представляют отдельных работ сетевых планов. Поэтому в соответствующих сетевых СФЦ они могут представляться либо с помощью фиктивных вершин, либо с помощью отдельных функциональных вершин с нулевой продолжительностью ($t_i = 0$).

Так, в рассматриваемом примере для построения сетевой СФЦ, представляющей СГ событий, изображенный на рисунке 3.1.б, выделены фиктивные вершины

$$j \in 8, 9, 10, ..., 15 . \qquad (3.2)$$

4 Все направленные ребра в типовых графах сетевых планов имеют вид стрелок (см. рисунок 3.1). В соответствующих сетевых СФЦ эти направленные ребра должны представляться прямыми (не инверсными) конъюнктивными дугами (оканчиваются точками). Это обусловлено тем, что в СФЦ дуги со стрелками используются для представления логической операции дизъюнкции (логическое сложение, операция "ИЛИ", резервирование), а дуги с точками – для представления логической конъюнкции (операция "И", все вместе).

По определению в сетевых планах PERT предусматривается обязательное выполнение всех работ, что корректно представляется в соответствующих СФЦ конъюнктивными дугами последовательно-параллельных связей функционального подчинения. Следует отметить, что в альтернативном сетевом планировании GERT используются многовариантные сетевые графики работ. В этом случае, для учета указанной многовариантности, в соответствующих сетевых СФЦ должны применяться, наряду с конъюнктивными, и дизъюнктивные связи функционального подчинения.

Выполнение указанных четырех положений разработанной методики позволяет корректно представить в форме сетевой СФЦ обе типовые формы – сетевых графиков работ и сетевых графиков событий.

В качестве демонстрационного примера с помощью разработанных положений выполнен переход от заданных на рисунке 3.1 типовых сетевых графиков к соответствующим сетевым СФЦ, изображенным на рисунке 3.2.

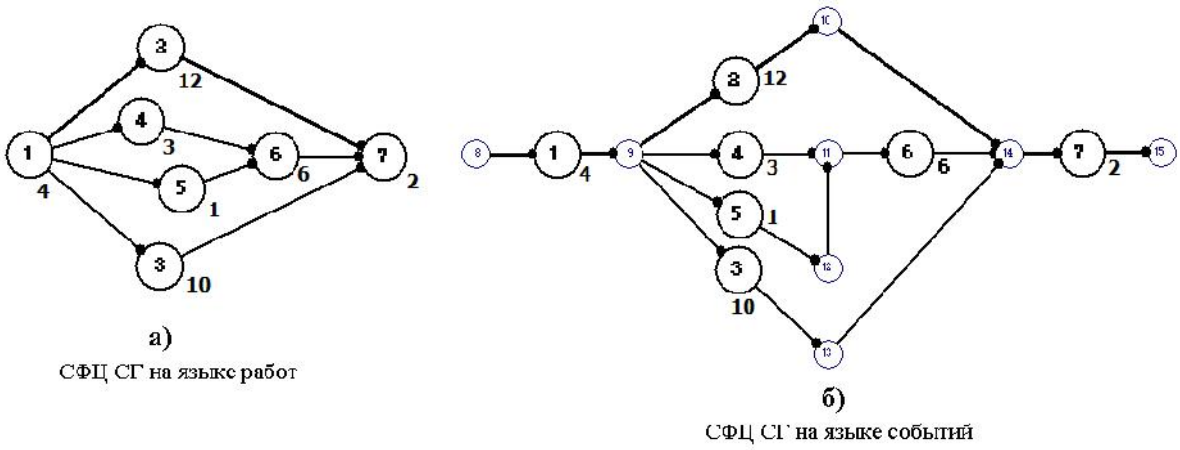


Рисунок 3.2 – СФЦ сетевых графиков работ и событий

Согласно (3.1) на обоих рисунках функциональными вершинами с номерами ***i = 1–7*** представлены работы исходных сетевых планов (см. рисунок 3.1). Рядом с этими вершинами записаны заданные продолжительности соответствующих работ. Согласно (3.2) в СФЦ на рисунке 3.2.б фиктивными вершинами с номерами ***j = 8–15*** представлены события исходного сетевого графика, изображенного на рисунке 3.1.б. Все ребра-стрелки графов исходных сетевых планов (см. рисунок 3.1) в эквивалентных СФЦ (см. рисунок 3.2) заменены конъюнктивными дугами связей функционального подчинения.

Сравнение рисунков 3.1 и 3.2 показывает, что трудоемкость формирования схем сетевых планов графическим аппаратом СФЦ не превышает трудоемкости их построения традиционными графическими средствами сетевого планирования и управления.

Из сказанного следует, что графический аппарат сетевых СФЦ позволяет корректно представлять все виды сетевых планов работ, т.е. является универсальным и полным графическим и аналитическим средством постановки задач сетевого планирования и управления.

3.1.2 Построение аналитических моделей сетевых планов работ

Это второй этап разрабатываемой методики структурно-логического моделирования и расчета показателей систем СПУ, который включает в себя следующие два основных действия:

1 При ручном моделировании сформированный на первом этапе граф СФЦ анализируемой системы СПУ преобразуется в соответствующую систему логических уравнений (2.1). При автоматизированном моделировании необходимая система логических уравнений формируется автоматически сразу после ввода графа сетевой СФЦ в программный комплекс (например, [54]).

2 С помощью разработанного ранее СГМ последовательностей событий (см. Главу 2) по критерию конечной работы сетевой СФЦ определяется логическая модель (сетевая логическая функция) $\boldsymbol{Y_C}$ сетевого плана

$$\boldsymbol{Yc}\ \mathrm{Z}\ \left|\begin{matrix} \boldsymbol{L_1} \\ \boldsymbol{L_2} \\ \mathrm{J}\ \mathrm{J} \\ \boldsymbol{L_K} \end{matrix}\right|\ \mathrm{Z}\ \left|\begin{matrix} \boldsymbol{x_{1.1}}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_{1.2}}\ \dot{\mathrm{e}}\ \ldots\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_{1.n}} \\ \boldsymbol{x_{2.1}}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_{2.2}}\ \dot{\mathrm{e}}\ \ldots\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_{2.m}} \\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J} \\ \boldsymbol{x_{K.1}}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_{K.2}}\ \dot{\mathrm{e}}\ \ldots\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_{K.d}} \end{matrix}\right|\ \mathrm{Z}\ \left|\begin{matrix} \boldsymbol{x_{1.1}}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_{1.2}}\ \grave{\mathrm{i}}\ \ldots\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_{1.n}} \\ \boldsymbol{x_{2.1}}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_{2.2}}\ \grave{\mathrm{i}}\ \ldots\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_{2.m}} \\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J}\ \mathrm{J} \\ \boldsymbol{x_{K.1}}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_{K.2}}\ \grave{\mathrm{i}}\ \ldots\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_{K.d}} \end{matrix}\right| \qquad (3.3)$$

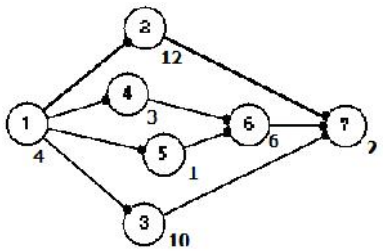
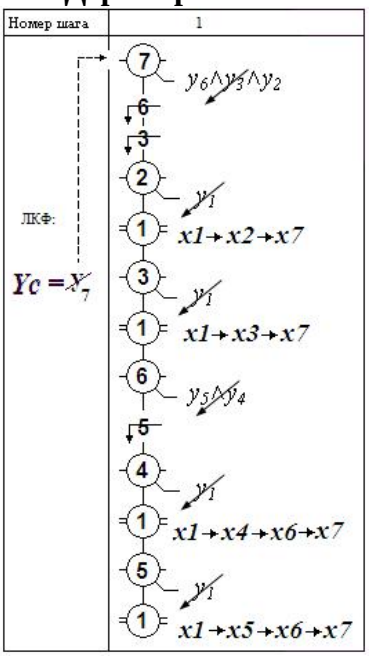
Для одноцелевых сетевых планов эта логическая модель представляет собой одну сетевую конъюнкцию, состоящую из $\boldsymbol{K}$ отдельных конъюнктивных последовательных групп $\boldsymbol{L_k}$ работ $\boldsymbol{x_i}$, $\boldsymbol{i = 1,2, \ldots, H}$ (см. §2.1.2, выражение (2.7)). Функция (3.3) может быть определена вручную (см. §2.2.1) или автоматически с помощью разработанного программного модуля, описанного в §2.3.

В таблице 3.1 приведены результаты применения ручной методики построения аналитической модели $\boldsymbol{Y_C}$ сетевого плана работ рассматриваемого примера (см. рисунки 3.1.а и 3.2.а).

Согласно таблице 3.1 логическая функция $\boldsymbol{Y_C}$ сетевого плана рассматриваемого примера, полученная с помощью СГМ последовательностей событий, представляет собой выражение (3.4)

$$\boldsymbol{Yc}\ \mathrm{Z}\ \boldsymbol{y_7}\ \mathrm{Z}\ \left|\begin{matrix} \boldsymbol{x_1}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_2}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_7} \\ \boldsymbol{x_1}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_3}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_7} \\ \boldsymbol{x_1}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_4}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_6}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_7} \\ \boldsymbol{x_1}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_5}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_6}\ \dot{\mathrm{e}}\ \boldsymbol{x_7} \end{matrix}\right|\ \mathrm{Z}\ \left|\begin{matrix} \boldsymbol{1} \\ \boldsymbol{2} \\ \boldsymbol{3} \\ \boldsymbol{4} \end{matrix}\right|\left|\begin{matrix} \boldsymbol{x_1}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_2}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_7} \\ \boldsymbol{x_1}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_3}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_7} \\ \boldsymbol{x_1}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_4}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_6}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_7} \\ \boldsymbol{x_1}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_5}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_6}\ \grave{\mathrm{i}}\ \boldsymbol{x_7} \end{matrix}\right|\ \left|\begin{matrix} \boldsymbol{L_1} \\ \boldsymbol{L_2} \\ \boldsymbol{L_3} \\ \boldsymbol{L_4} \end{matrix}\right| \qquad (3.4)$$

Таблица 3.1 – Определение аналитической модели сетевого плана работ

СФЦ сетевого плана работ	**Дерево решений**
	
Система логических уравнений $y1 = true$ $y2 = x2 \wedge y1$ $y3 = x3 \wedge y1$ $y4 = x4 \wedge y1$ $y5 = x5 \wedge y1$ $y6 = x6 \wedge y4 \wedge y5$ $y7 = x7 \wedge y6 \vee y3 \wedge y2$	

На рисунке 3.3 приведены результаты автоматического построения аналитической модели ***Yc*** на основе СФЦ сетевого плана событий рассматриваемого примера (см. рисунки 3.1.б и 3.2.б).

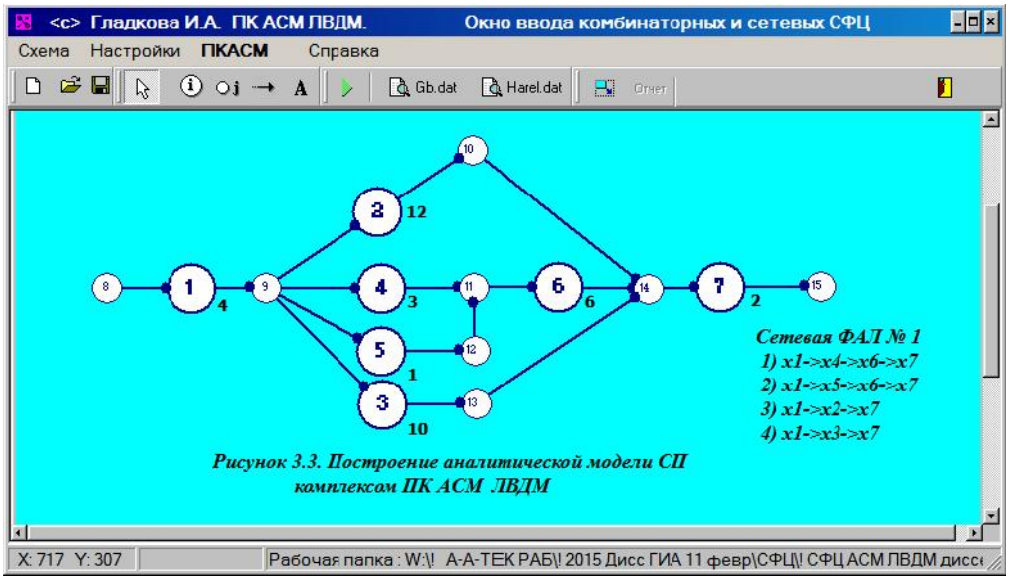


Рисунок 3.3 – Построение аналитической модели сетевого плана комплексом "ПК АСМ ЛВДМ"

Автоматизированное моделирование выполнено с помощью разработанного сетевого графоаналитического метода (см. §2.2) и его программной реализации (см. §2.3) в комплексе "ПК АСМ ЛВДМ" [54, глава 4 диссертации]. Приведенный на рисунке 3.3 результат получен на основе СФЦ сетевого плана событий (см. ри-

сунок 3.2.б). Он полностью совпал с результатом (3.4) ручного аналитического моделирования, выполненного на основе СФЦ сетевого плана работ (см. рисунок 3.2.а, (3.4) и таблица 3.1).

Сетевая ФАЛ (3.4) представляет собой одну сетевую конъюнкцию, содержащую группу из четырех (***K***=4) параллельных последовательностей событий/работ x_i. Эта функция далее используется в разрабатываемой методике расчетов всех числовых показателей сетевых планов. Для удобства иллюстрации следующих этапов методики структурно-логического моделирования и расчета показателей систем СПУ указанные в (3.4) последовательности работ пронумерованы ***k*** = 1, 2, 3, 4 и обозначены переменными L_k:

$$\begin{array}{l} L_1 \ \text{Z}\ x_1 \ \text{ì}\ x_2 \ \text{ì}\ x_7 \\ L_2 \ \text{Z}\ x_1 \ \text{ì}\ x_3 \ \text{ì}\ x_7 \\ L_3 \ \text{Z}\ x_1 \ \text{ì}\ x_4 \ \text{ì}\ x_6 \ \text{ì}\ x_7 \\ L_4 \ \text{Z}\ x_1 \ \text{ì}\ x_5 \ \text{ì}\ x_6 \ \text{ì}\ x_7 \end{array} \qquad (3.5)$$

Этот результат является свидетельством корректности разработанной методики автоматического построения аналитических моделей СП.

3.1.3 Расчет показателей сетевых планов работ

В соответствии с действующими положениями [28-30] результативность сетевых планов работ количественно оценивается (см. вводную часть §3.1) следующими двумя группами основных показателей.

Группа 1 – показатели путей сетевого плана:

– T_k – минимальные продолжительности отдельных последовательностей L_k работ (путей) сетевого плана Y_C;

– $T_{КП}$ – длительность критических путей реализации сетевого плана Y_C;

– R_k – запас времени каждого ***k***-го не критического пути сетевого плана.

Группа 2 – показатели работ сетевого плана:

– $t_{P\text{-}H}(i)$ – ранний срок начала каждой ***i***-й работы сетевого плана;

– $t_{P\text{-}O}(i)$ – ранний срок окончания каждой ***i***-й работы сетевого плана;

– $t_{П\text{-}H}(i)$ – поздний срок начала каждой ***i***-й работы сетевого плана;

– $t_{П\text{-}О}(i)$ – поздний срок окончания каждой i-й работы сетевого плана;

– $R_П(i)$ – полный резерв времени каждой i-й некритической работы;

– $R_С(i)$ – свободный (собственный) резерв времени каждой i-й некритической работы.

Существующие правила расчета указанных показателей основываются на их определениях, данных в классической теории сетевого планирования и управления [28-30], и использовании при выполнении расчетов типовых форм представления сетевых графиков работ (например, рисунок 3.1.а) или сетевых графиков событий (например, рисунок 3.1.б). Особенность разрабатываемой расчетной части методики СЛМ РП систем СПУ заключается в том, что она основывается на новых способах представления всех видов сетевых планов с помощью сетевых СФЦ и сетевых ФАЛ – $L_k \in Yc$, $k = 1, 2, 3, \ldots, K$. При этом уровень детализации и форма этой разработки должны обеспечить возможность ее последующей алгоритмизации и программной реализации.

Разработанные правила выполнения расчетов показателей СПУ иллюстрируются прежним примером сетевого плана, приведенного на рисунках 3.1 и 3.2, для которого приняты следующие значения параметров продолжительностей его отдельных работ [29, с. 12]:

$$t_1 = 4,\ t_2 = 12,\ t_3 = 10,\ t_4 = 3,\ t_5 = 1,\ t_6 = 6,\ t_7 = 2. \qquad (3.6)$$

<u>Методика расчета Группы 1 показателей путей сетевого плана</u>

Расчет длительности T_k отдельных путей сетевого плана работ

Согласно [29, с. 23], длиной T_k пути L_k сетевой модели $L_k \in Yc$, $k = 1, 2, 3, \ldots, K$ называют сумму длительностей t_i всех работ x_i, входящих в состав этого пути ($x_i \in L_k$). Поэтому расчет значений T_k в методике СЛМ РП систем СПУ можно выполнить на основе следующего простого соотношения

$$T_k = \sum_{i = \{x_i \in L_k\}} t_i, \qquad k = 1,2,\ldots,K. \qquad (3.7)$$

При выполнении вычислений (3.7) считается, что первые работы x_i во всех L_k начинаются в момент времени, равный нулю, а следующие работы в каждом пути начинаются в момент окончания предыдущей работы.

В рассматриваемом примере на основе сетевой ФАЛ (3.4), (3.5) с помощью правила (3.7) вычислены следующие значения продолжительностей отдельных последовательностей работ (длин путей) сетевого плана, изображенного на рисунках 3.1 и 3.2:

$$\begin{array}{l} T_1 = t_1 + t_2 + t_7 = 4 + 12 + 2 = 18 \\ T_2 = t_1 + t_3 + t_7 = 4 + 10 + 2 = 16 \\ T_3 = t_1 + t_4 + t_6 + t_7 = 4 + 3 + 6 + 2 = 15 \\ T_4 = t_1 + t_5 + t_6 + t_7 = 4 + 1 + 6 + 2 = 13 \end{array} \qquad (3.8)$$

Определение критических путей $L_{КП}$ сетевого плана работ

Критическим путем $L_{КП}$ сетевой модели $L_k \in Yc$, $k = 1, 2, 3, \ldots, K$ называют путь максимальной длины [29, с. 23]. Поэтому в методике СЛМ РП систем СПУ определение критического пути $L_{КП}$ осуществляется путем выделения из множества Y_C того пути L_k, который имеет наибольшую длину $T_K = max$

$$L_{КП} = L_k /_{T_K = max} . \qquad (3.9)$$

Длина $T_{КП} = t(L_{КП})$ критического пути $L_{КП}$ определяет минимальную продолжительность всего анализируемого сетевого плана работ. В сетевом плане может быть несколько критических путей. Все работы x_i, входящие в критические пути ($x_i \in L_{КП}$), составляют множество **критических работ** сетевого плана.

В рассматриваемом примере максимальной является, согласно (3.8), длительность первого пути $L_{КП} = L_1$, следовательно

$$T_{КП} = T_1 = 18. \qquad (3.10)$$

Критическим путем является

$$L_{КП} = L_1 = x_1 \cap x_2 \cap x_7 , \qquad (3.11)$$

а критическими работами являются, соответственно, x_1, x_2 и x_7.

Расчет запасов времени R_k путей сетевого плана работ

После определения согласно (3.7) значений T_k длительности всех путей L_k сетевого плана и продолжительности $T_{КП}$ критического пути выполняются расчеты показателей R_k запаса времени для каждого пути сетевого плана

$$R_k = T_{КП} - T_k , \; k = 1, 2, \ldots, K. \qquad (3.12)$$

В рассматриваемом примере значения показателей запаса времени путей составляют:

$$\begin{aligned} &R_1 \text{ Z } T_{КП} \text{ J } T_1 \text{ Z } 18 \text{ J } 18 \text{ Z } 0; \\ &R_2 \text{ Z } T_{КП} \text{ J } T_2 \text{ Z } 18 \text{ J } 16 \text{ Z } 2; \\ &R_3 \text{ Z } T_{КП} \text{ J } T_3 \text{ Z } 18 \text{ J } 15 \text{ Z } 3; \\ &R_4 \text{ Z } T_{КП} \text{ J } T_4 \text{ Z } 18 \text{ J } 13 \text{ Z } 5. \end{aligned} \qquad (3.13)$$

<u>Методика расчета Группы 2 показателей работ сетевого плана</u>

В этой части методики СЛМ РП систем СПУ должны выполняться расчеты шести показателей (указаны в разделе "Группа 2 …" вводной части §3.1.3) для каждой работы анализируемого сетевого плана. Разработанная методика выполнения расчетов этих показателей основывается на использовании следующих двух видов специальных таблиц – **элементной расчетной матрицы** (ЭРМ) $w_{ik}(n,m)$ (см. таблицу 3.2) и **общей расчетной таблицы** (таблица 3.3).

Таблица 3.2 – Элементная расчетная матрица $w_{ik}(n,m)$ показателей x_i -ой работы, находящейся на i-ой позиции k-го пути сетевого плана

	0	x_i	t_i		*Номер / Продолжительность работы*
ì	1	$t_{PJH}(x_i)$	$t_{PJO}(x_i)$	ì	*Ранние сроки работы*
	2	$t_{ПJH}(x_i)$	$t_{ПJO}(x_i)$		*Поздние сроки работы*
	3	$R_П(x_i)$	$R_C(x_i)$		*Резервы времени работы*
		1	2		

Таблица 3.3 – Общая расчетная таблица $W_{СГ}(k, w_{ik}(n,m))$ показателей $w_{ik}(n,m)$ x_i-х работ k-го пути сетевого плана

Общая расчетная таблица $W_{СГ}(k, w_{ik}(n,m))$												
I		***1***			***2***			***3***				
k		***1***	***2***		***1***	***2***		***1***	***2***			***Примечание***
1	**0**	x_i	t_i	ì	x_j	t_j	ì	x_l	t_l	…		*Работа /Продолжит.*
	1											*Ранние сроки работы*
	2											*Поздние сроки работы*
	3											*Резервы работы*
2	**0**	x_i	t_i	ì	x_j	t_j	ì	x_l	t_l	…		*Работа /Продолжит.* **КП**
	1											*Ранние сроки работы*
	2											*Поздние сроки работы*
	3											*Резервы работы*
K	**0**	x_i	t_i	ì	x_j	t_j	ì	x_l	t_l	…		*Работа /Продолжит.*
	1											*Ранние сроки работы*
	2											*Поздние сроки работы*
	3											*Резервы времени работы*

Каждая ЭРМ $w_{ik}(n,m)$ работы x_i имеет фиксированную структуру – четыре строки с номерами n = 0, 1, 2, 3 и два столбца с номерами m = 1, 2. В ячейках нулевой строки ЭРМ хранятся номер работы x_i и ее заданная продолжительность t_i. В шести нижних ячейках матрицы (строки 1, 2 и 3) хранятся промежуточные и окончательные значения шести вычисляемых показателей этой работы в каждом отдельном пути L_k, $k=1, 2, \ldots, K$ сетевого плана.

Структурно, общая расчетная таблица $W_{CГ}(J,k,I,n,m)$, $k=1, 2, \ldots, K$; $n = 0, 1, 2, 3$; $m = 1, 2$, является подобием (структурной копией) логической модели (сетевой логической функции) Y_C сетевого плана (2.7), (3.3), получаемой на втором этапе построения аналитической модели сетевого плана (см. §3.1.2). Однако на позициях i Č I отдельных работ x_i в табл.3.3 размещены соответствующие им элементные расчетные матрицы (см. таблицу 3.2). Поэтому в данной общей таблице содержится вся необходимая для расчетов информация о путях $k(L_k)$ и позициях I отдельных работ x_i аналитической формы сетевого плана Y_C (см. строки $k=1, 2, \ldots, K$ таблицы 3.3), а работы x_i в этих маршрутах представлены соответствующими элементными расчетными матрицами.

Разработанные правила выполнения методики расчета Группы 2 показателей сетевого плана работ представляют собой следующую последовательность основных действий (шагов).

<u>Шаг 1</u>. На основе полученной ранее (§3.1.2) аналитической модели Y_C сетевого плана подготавливается основная расчетная таблица. В ячейки нулевых строк всех ЭРМ записываются значения номера и продолжительности соответствующей работы (3.14).

$$w_{ik}(0,1) = x_i, \; w_{ik}(0,2) \text{ Z } t_{xi}, \quad k = 1, 2, \ldots, K. \tag{3.14}$$

В таблице 3.4 приведена исходная форма общей расчетной таблицы рассматриваемого примера сетевого плана (см. рисунки 3.1 и 3.2), построенная на основе логической ФАЛ (3.4).

Таблица 3.4 – Исходная расчетная таблица примера сетевого плана

Общая расчетная таблица $W_{CГ}(J,k,I,n,m)$														
I		**1**			**2**			**3**			**4**			
k		**1**	**2**		**1**	**2**		**1**	**2**		**1**	**2**		***Примечание***
1	**0**	x_1	**4**	ì	x_2	**12**	ì	x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*
	1													*Ранние сроки работы*
	2													*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
2	**0**	x_1	**4**	ì	x_3	**10**	ì	x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*
	1													*Ранние сроки работы*
	2													*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
3	**0**	x_1	**4**	ì	x_4	**3**	ì	x_6	**6**	ì	x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*
	1													*Ранние сроки работы*
	2													*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
4	**0**	x_1	**4**	ì	x_5	**1**	ì	x_6	**6**	ì	x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*
	1													*Ранние сроки работы*
	2													*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*

Здесь и далее серым цветом в основной расчетной таблице рассматриваемого примера будут выделяться ячейки ЭРМ, в которых записываются новые значения показателей, определяемые на текущем шаге данной расчетной методики.

<u>Шаг 2.</u> На втором шаге методики выполняются расчеты первичных (промежуточных) значений ранних сроков начала $t_{PJH}(x_i)$ и окончания $t_{PJO}(x_i)$ работ x_i, расположенных на позициях i Č I в каждом отдельном пути k Č L_k сетевого плана. Эти значения записываются соответственно в ячейки 1 и 2 строки 1 всех ЭРМ общей расчетной таблицы сетевого плана. Вычисления значений и записи этих показателей осуществляются по следующим правилам:

1 В ячейки $w_{ik}(1,1)$ всех первых слева ЭРМ (начало всех путей) записываются значения **0** (ноль) (3.15). Это означает, что первые работы каждого пути L_k начинаются в нулевой начальный момент времени реализации сетевого плана

$$w_{ik}(1,1) \text{ Z } t_{PJH}(x_i) \text{ Z } 0, \qquad (3.15)$$

i – номер первой работы x_i в каждом пути L_k ,
$k = 1, 2, \ldots, K$.

2 В ячейки $w_{ik}(1,2)$ всех первых слева ЭРМ (начало всех путей) записываются значения t_i времени выполнения первых работ каждого пути

$$w_{ik}(1,2) = w_{ik}(0,2) + t_{РЛО}(x_i) = t_i \,, \qquad (3.16)$$

i – номер первой работы x_i каждого пути L_k,
$k = 1, 2, \ldots, K$.

В рассматриваемом примере все пути начинаются с работы x_1 (см. (3.5)) длительностью t_{x1} = 4 (см. (3.6)). Поэтому в ячейки 1 и 2 строк 1 первых ЭРМ всех путей $k = 1, 2, 3$ *и* 4 записываются значения

$$w_{ik}(1,1) = t_{РЛН}(1) = 0 \;\; и \;\; w_{ik}(1,2) = t_{РЛО}(1) = 4$$

$$i = 1, \quad k = 1, 2, 3, 4.$$

3 Обозначим в каждом k–ом пути индексом i номера работ, начиная от второй и до последней включительно, а индексом j – номер предыдущей относительно i работы. Ячейки 1 и 2 строк 1 ЭРМ всех работ, следующих за первой работой в путях $k = 1, 2, \ldots, K$ общей расчетной таблицы сетевого плана, заполняются попарно слева направо по следующим двум правилам.

$$w_{ik}(1,1) = t_{РЛН}(i) = t_{РЛО}(j) = w_{jk}(1,2), \qquad (3.17)$$

i – номер текущей работы x_i данного пути L_k;
j – номер предыдущей относительно i работы x_j данного пути L_k;
$k = 1, 2, \ldots, K$.

$$w_{ik}(1,2) = t_{РЛО}(i) = t_{Р\text{-}Н}(i) + t_i = w_{ik}(1,1) + w_{ik}(0,2), \qquad (3.18)$$

$t_{РЛН}(i) = w_{ik}(1,1)$ – значение, определенное согласно (3.17);
$t_i = w_{ik}(0,2)$ – заданное значение продолжительности работы x_i;
$k = 1, 2, \ldots, K$.

Здесь значение раннего начала $t_{Р\text{-}Н}(i)$ текущей работы x_i равно вычисленному по правилу (3.17) на предыдущем шаге значению раннего окончания $t_{Р\text{-}О}(j)$ предыдущей j-ой работы данного пути k сетевого плана.

Выполнение указанных в (3.15) – (3.18) действий для рассматриваемого примера приводит к получению результатов, представленных в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчет промежуточных значений ранних сроков начала и окончания работ примера сетевого плана

Общая расчетная таблица $W_{СГ}(J, k, I, n, m)$														
k		***1***	***2***		***1***	***2***		***1***	***2***		***1***	***2***		***Примечание***
1	**0**	x_1	**4**		x_2	**12**		x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*
	1	**0**	**4**	ì	**4**	**16**	ì	**16**	**18**					*Ранние сроки работы*
	2													*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
2	**0**	x_1	**4**		x_3	**10**		x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*
	1	**0**	**4**	ì	**4**	**14**	ì	**14**	**16**					*Ранние сроки работы*
	2													*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
3	**0**	x_1	**4**		x_4	**3**		x_6	**6**		x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*
	1	**0**	**4**	ì	**4**	**7**	ì	**7**	**13**	ì	**13**	**15**		*Ранние сроки работы*
	2													*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
4	**0**	x_1	**4**		x_5	**1**		x_6	**6**		x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*
	1	**0**	**4**	ì	**4**	**5**	ì	**5**	**11**	ì	**11**	**13**		*Ранние сроки работы*
	2													*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*

<u>Шаг 3.</u> На данном шаге расчетной части методики СЛМ РП сетевых планов вычисляются числовые значения поздних сроков начала $t_{П\text{-}Н}(i)$ и окончания $t_{П\text{-}О}(i)$ каждой работы x_i в каждом отдельном пути L_k сетевого плана. Эти значения сохраняются в ячейках 1 и 2 строк 2 всех ЭРМ общей расчетной таблицы сетевого плана.

Сначала выполняются расчеты первичных (промежуточных) значений показателей поздних сроков начала и окончания работ по следующим правилам:

$$\begin{aligned} &w_{ik}(2,1) \text{Z } t_{ПJH}(i) \text{Z } t_{PJH}(i) \text{H } R_k \text{ Z } w_{ik}(1,1) \text{H } R_k; \\ &w_{ik}(2,2) \text{Z } t_{ПJO}(i) \text{Z } t_{PJO}(i) \text{H } R_k \text{ Z } w_{ik}(1,2) \text{H } R_k; \end{aligned} \qquad (3.19)$$

i – номер текущей работы x_i данного пути L_k;

$t_{PJH}(i)$ Z $w_{ik}(1,1)$ – значение раннего начала работы, вычисленное по правилу (3.17);

$t_{PJO}(i)$ Z $w_{ik}(1,2)$ – значение раннего окончания работы, вычисленное по правилу (3.18);

R_k – запас времени k-го пути, вычисленное ранее по правилу (3.12); $k = 1, 2, \ldots, K$.

Технологически вычисления (3.19) выполняются путем увеличения значений, размещенных в ячейках 1 и 2 строк 1 общей расчетной таблицы, на величину R_k и

записи полученного результата в соответствующую нижестоящую ячейку строки 2 ЭРМ каждой работы x_i в каждом k-ом пути сетевого плана. Полученные этим способом результаты расчета рассматриваемого примера сетевого плана приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Расчет промежуточных значений поздних сроков начала и окончания работ примера сетевого плана

Общая расчетная таблица $W_{СГ}(J,k,I,n,m)$														
k		1	2		1	2		1	2		1	2		***Примечание***
1	**0**	x_1	**4**	ì	x_2	**12**	ì	x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*
	1	**0**	**4**		**4**	**16**		**16**	**18**					*Ранние сроки работы*
	2	**0**	**4**		**4**	**16**		**16**	**18**					*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
2	**0**	x_1	**4**	ì	x_3	**10**	ì	x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*
	1	**0**	**4**		**4**	**14**		**14**	**16**					*Ранние сроки работы*
	2	**2**	**6**		**6**	**16**		**16**	**18**					*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
3	**0**	x_1	**4**	ì	x_4	**3**	ì	x_6	**6**	ì	x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*
	1	**0**	**4**		**4**	**7**		**7**	**13**		**13**	**15**		*Ранние сроки работы*
	2	**3**	**7**		**7**	**10**		**10**	**16**		**16**	**18**		*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*
4	**0**	x_1	**4**	ì	x_5	**1**	ì	x_6	**6**	ì	x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*
	1	**0**	**4**		**4**	**5**		**5**	**11**		**11**	**13**		*Ранние сроки работы*
	2	**5**	**9**		**9**	**10**		**10**	**16**		**16**	**18**		*Поздние сроки работы*
	3													*Резервы времени работы*

<u>Шаг 4.</u> Выполняется корректировка вычисленных на предыдущих шагах 2 и 3 значений показателей ранних и поздних сроков начала и окончания работ x_i в отдельных путях L_k, k=1, 2, …, K сетевого плана. Корректировка обусловлена тем, что значения $t_{РJH}(x_i)$, $t_{РJO}(x_i)$, $t_{ПJH}(x_i)$, $t_{ПJO}(x_i)$ ранее были вычислены отдельно для каждого пути, т.е. без учета реальных взаимосвязей этих путей в сетевом плане работ. Для корректировки этих значений необходимо выполнить следующие действия.

Действие 1. Во всех не критических путях вычисленные ранее значения показателей $t_{РЛН}(x_i)$, $t_{РЛО}(x_i)$, $t_{ПЛН}(x_i)$, $t_{ПЛО}(x_i)$ критических работ x_i Č L_k Z $L_{КП}$ устанавливаются равными тем значениям этих показателей, которые были вычислены в критическом пути (в критических путях) L_k Z $L_{КП}$.

Действие 2. Выполняется корректировка значений ранних сроков начала $t_{РЛН}(x_i)$ и окончания $t_{РЛО}(x_i)$ всех некритических работ x_i č L_k Z $L_{КП}$ сетевого плана. Она заключается в том, что из всех ранних параметров каждой некритической работы x_i, находящихся в разных путях k СП, выбираются те, которые имеют **наибольшие** (максимальные между собой) значения ($max\{t_{РЛН}(x_i)\}$, $max\{t_{РЛО}(x_i)\}$). Эти значения устанавливаются в соответствующие ячейки ЭРМ работ x_i всех путей сетевого плана.

$$w_{ik}(1,1) \text{ Z } max\{t_{РЛН}(i)\},$$
$$w_{ik}(1,2) \text{ Z } max\{t_{РЛО}(i)\} \qquad (3.20)$$

Так в примере из таблицы 3.6 следует, что $t_{P\text{-}H}(6)$ и $t_{P\text{-}O}(6)$ в путях L_3 и L_4 имеют разные значения:

– в пути L_3 они составляют

$$t_{РЛН}(6) \text{ Z } w_{63}(1,1) \text{ Z } 7;\ t_{РЛО}(6) \text{ Z } w_{63}(1,2) \text{ Z } 13.$$

– в пути L_4 они составляют

$$t_{РЛН}(6) \text{ Z } w_{64}(1,1) \text{ Z } 5;\ t_{РЛО}(6) \text{ Z } w_{64}(1,2) \text{ Z } 11.$$

Поэтому значения этих показателей в пути L_4 (*ячейки* $w_{64}(1,1)$, $w_{64}(1,2)$) должны быть заменены правильными, бóльшими значениями (размещены в *ячейках* $w_{63}(1,1)$, $w_{63}(1,2)$), вычисленными в пути L_3.

После выполнения данного шага все работы i, указанные в разных путях сетевого плана, имеют одинаковые значения показателей (см. таблицу 3.7).

Таблица 3.7 – Корректировка значений показателей ранних и поздних сроков работ в некритических путях примера сетевого плана

Общая расчетная таблица $W_{СГ}(J,k,I,n,m)$															
k		1	2		1	2		1	2		1	2		***Примечание***	
1	**0**	x_1	**4**	ì	x_2	**12**	ì	x_7	**2**					*Работа / Продолжит. КП*	**КП**
	1	**0**	**4**		**4**	**16**		**16**	**18**					*Ранние сроки работы*	
	2	**0**	**4**		**4**	**16**		**16**	**18**					*Поздние сроки работы*	
	3													*Резервы времени работы*	
2	**0**	x_1	**4**	ì	x_3	**10**	ì	x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*	
	1	**0**	**4**		**4**	**14**		**16**	**18**					*Ранние сроки работы*	
	2	**0**	**4**		**6**	**16**		**16**	**18**					*Поздние сроки работы*	
	3													*Резервы времени работы*	
3	**0**	x_1	**4**	ì	x_4	**3**	ì	x_6	**6**	ì	x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*	
	1	**0**	**4**		**4**	**7**		**7**	**13**		**16**	**18**		*Ранние сроки работы*	
	2	**0**	**4**		**7**	**10**		**10**	**16**		**16**	**18**		*Поздние сроки работы*	
	3													*Резервы времени работы*	
4	**0**	x_1	**4**	ì	x_5	**1**	ì	x_6	**6**	ì	x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*	
	1	**0**	**4**		**4**	**5**		**7**	**13**		**16**	**18**		*Ранние сроки работы*	
	2	**0**	**4**		**9**	**10**		**10**	**16**		**16**	**18**		*Поздние сроки работы*	
	3													*Резервы времени работы*	

<u>Шаг 5.</u> Выполняются расчеты показателей полных $R_П(i)$ и свободных $R_C(i)$ резервов времени всех работ x_i сетевого плана, значения которых записываются в последнюю третью строку ЭРМ каждой работы.

1 Полный резерв времени $R_П(i)$ работы x_i равен [29, с. 24] разности между поздним и ранним сроками начала данной работы

$$w_i(3,1) \text{Z} R_П(i) \text{Z} t_{ПJH}(i) \text{J} t_{PJH}(i) \text{Z} w_i(2,1) \text{J} w_i(1,1); \tag{3.21}$$

i – номера работ сетевого плана.

2 Свободный (собственный) резерв времени $R_C(i)$ работы x_i равен [29, С. 24–25)] разности между минимальным из ранних сроков начала всех работ x_j, непосредственно следующих за данной работой x_i, и ранним сроком ее окончания.

$$w_i(3,2) \text{Z} R_C(i) \text{Z} \min\{ t_{PJH}(j) \text{J} t_{PJO}(i)\} \text{Z} \min\{ w_j(1,1) \text{J} w_i(1,2); \tag{3.22}$$

***i** – номера работ сетевого плана;*

***j** – номера работ, непосредственно следующих за работой **i**.*

Выполняя расчеты по правилам (3.21), (3.22), в рассматриваемом примере сетевого плана получаем окончательные результаты (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Результаты расчетов резервов времени $R_П(i)$ и $R_C(i)$ выполнения работ примера сетевого плана

Общая расчетная таблица $W_{СГ}(J,k,I,n,m)$															
k		1	2		1	2		1	2		1	2		***Примечание***	
1	**0**	x_1	**4**	ì	x_2	**12**	ì	x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*	**КП**
	1	**0**	**4**		**4**	**16**		**16**	**18**					*Ранние сроки работы*	
	2	**0**	**4**		**4**	**16**		**16**	**18**					*Поздние сроки работы*	
	3	**0**	**0**		**0**	**0**		**0**	**0**					*Резервы времени работы*	
2	**0**	x_1	**4**	ì	x_3	**10**	ì	x_7	**2**					*Работа / Продолжит.*	
	1	**0**	**4**		**4**	**14**		**16**	**18**					*Ранние сроки работы*	
	2	**0**	**4**		**6**	**16**		**16**	**18**					*Поздние сроки работы*	
	3	**0**	**0**		**2**	**2**		**0**	**0**					*Резервы времени работы*	
3	**0**	x_1	**4**	ì	x_4	**3**	ì	x_6	**6**	ì	x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*	
	1	**0**	**4**		**4**	**7**		**7**	**13**		**16**	**18**		*Ранние сроки работы*	
	2	**0**	**4**		**7**	**10**		**10**	**16**		**16**	**18**		*Поздние сроки работы*	
	3	**0**	**0**		**3**	**0**		**3**	**3**		**0**	**0**		*Резервы времени работы*	
4	**0**	x_1	**4**	ì	x_5	**1**	ì	x_6	**6**	ì	x_7	**2**		*Работа / Продолжит.*	
	1	**0**	**4**		**4**	**5**		**7**	**13**		**16**	**18**		*Ранние сроки работы*	
	2	**0**	**4**		**9**	**10**		**10**	**16**		**16**	**18**		*Поздние сроки работы*	
														Резервы времени работы	

В таблице 3.9 приведены сводные результаты решения примера.

Таблица 3.9 – Сводные результаты расчетов показателей работ примера

№ работы i	Длит. работы t_i	Ранние сроки		Поздние сроки		Резервы времени	
		начала $t_{PJH}(i)$	окончания $t_{PJO}(i)$	начала $t_{ПJH}(i)$	окончания $t_{ПJO}(i)$	полные $R_П(i)$	свободные $R_C(i)$
1	**4**	**0**	**4**	**0**	**4**	**0**	**0**
2	**12**	**4**	**16**	**4**	**16**	**0**	**0**
3	**10**	**4**	**14**	**6**	**16**	**2**	**2**
4	**3**	**4**	**7**	**7**	**10**	**3**	**0**
5	**1**	**4**	**5**	**9**	**10**	**5**	**2**
6	**6**	**7**	**13**	**10**	**16**	**3**	**3**
7	**2**	**16**	**18**	**16**	**18**	**0**	**0**

Все результаты, представленные в таблице 3.9, совпали с результатами решения данного примера, приведенными в [29, с. 25, таблица 6], что подтверждает корректность разработанной методики СЛМ РП результативности сетевых планов работ.

3.2 Разработка методики структурно-логического моделирования и расчета показателей потоковых сетей

Графы $G(X,Y)$ (см. §2.1.1) потоковых сетей [31-35] во многом подобны рассмотренным выше графам сетевых планов работ. В них также представляются последовательности событий/работ передачи потоков (например, электрической мощности [31-33], напоров воды [34, 35] и т.п.) от источников к потребителям через элементы и линии передач сети. Вместе с тем, задачи моделирования и расчета показателей потоковых сетей имеют ряд особенностей, которые необходимо было учесть при разработке методики СЛМ РП результативности их функционирования:

1 Если рассмотренные выше графы сетевых планов работ в большинстве случаев являются конъюнктивными по построению (см. §3.1.1), то в графах потоковых сетей достоверно конъюнктивными являются только отдельные ветви – последовательности событий/работ, а конъюнктивность или дизъюнктивность связей между параллельными ветвями графов потоковых сетей могут быть многообразными и определяются заданным режимом функционирования системы.

2 Основными параметрами элементов сетевых планов являются аддитивные длительности t_i отдельных работ x_i, которые суммируются при расчете показателей отдельных последовательных путей. Элементы потоковых сетей характеризуются как некоторыми группами аддитивных параметров (например, сопротивления, протяженности, стоимости [33]), так и не аддитивными параметрами передаваемых по сети потоков (электрической мощности, воды и т.п.) от генерирующих элементов (источников) к потребителям.

3 Структуры и параметры потоковых сетей более изменчивы, чем структуры и параметры сетевых планов. Поэтому моделирование и расчет показателей их результативности принято сопоставлять с конкретными, заданными вариантами их структурного построения, характеристиками элементов, условиями и режимами их совместной работы.

4 Полный анализ результативности потоковых сетей предполагает построение как логических моделей минимальных **сечений отказов**, так и логических моделей различных вариантов **путей функционирования** [33, 52].

Разработанная методика СЛМ РП потоковых сетей включает в себя следующие составляющие решения задачи моделирования и расчета показателей их результативности:

1) Моделирование и расчет максимального потока в сети.

2) Моделирование и расчет показателей отдельных путей потоковой сети.

3) Моделирование и расчет рабочих показателей элементов и потоковой сети в целом.

Содержание основных этапов разработанной методики СЛМ РП результативности функционирования потоковых сетей далее иллюстрируется примером рассмотренного ранее фрагмента электрической сети, исходные структурные схемы и параметры элементов которой приведены на рисунках 1.1 и 1.2.

3.2.1 Моделирование и расчет максимального потока в сети

Рассматривается известная теорема о максимальном потоке в сети, впервые математически строго решенная Фордом (Ford) и Фалкерсоном (Fulkerson) в 1954 году [52, с.6]. Она звучит следующим образом: величина максимального потока не превышает величины минимального сечения. Ее реализация в разработанной методике СЛМ РП потоковых сетей определяется следующими действиями:

1 Сетевая система представляется графом $\boldsymbol{G(X,Y)}$ сетевой СФЦ работоспособности (см. §2.1.1) в форме, где все направленные дуги логических связей являются дизъюнктивными (заканчиваются стрелками). Такая форма дизъюнктивной сетевой СФЦ работоспособности хотя бы одного пути обеспечивает возможность моделирования с помощью ОЛВМ всех вариантов минимальных разрезов (минимальных сечений отказов) анализируемой потоковой сети.

2 Для всех **элементов** $\boldsymbol{i} = 1, 2, \ldots, \boldsymbol{H}$ потоковой сети, представленных в сетевой СФЦ функциональными вершинами, задаются **нормативные** (номинальные,

максимально допустимые) значения wn_i параметров потока (генерируемого, передаваемого, потребляемого).

3 На основе графа $G(X,Y)$ записывается соответствующая система логических уравнений (2.1), (2.2) и задается **инверсный** (относительно (2.13)) логический критерий

$$Yo \equiv \overline{Yc} \equiv f(\{y''_i\}, i \equiv 1,2,...,N), \qquad (3.23)$$

определяющий условие не реализации суммарного выходного потока (стока) сети, представленной сетевой СФЦ.

4 С помощью УГМ решения систем логических уравнений, разработанного в общем логико-вероятностном методе [7, 9, 18-20, 22, 54, 66, 68], определяется минимальная дизъюнктивная нормальная форма комбинаторной логической функции не реализации выходного потока (стока) сети

$$Y_o \equiv \bigcup_{j \equiv 1}^{J} \&_j \{x''_i\}, \quad i \equiv 1,2,...,H. \qquad (3.24)$$

Логическая ФРС (3.24) представляет все возможные J конъюнкций $\&_j\{x''_i\}$ минимальных сечений отказов (МСО) потоковой сети.

5 Для каждой $\&_j\{x''_i\}$, $j = 1, 2, \ldots, J$ конъюнкции сформированного МСО (3.24) вычисляется значение соответствующего ей суммарного номинального потока через это сечение

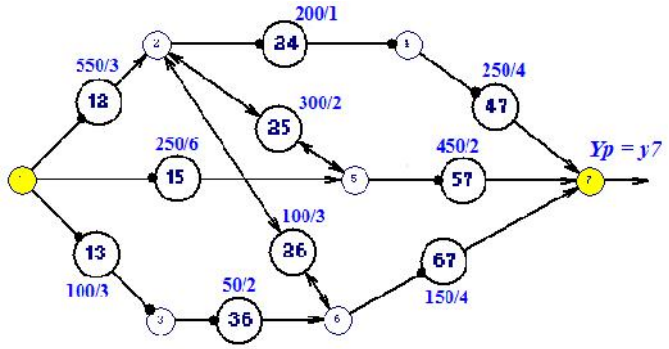
$$W_j \equiv \sum_{i \in \&_j} wn_i; \quad i \equiv 1,2,...,H; \quad j \equiv 1,2,...,J. \qquad (3.25)$$

6 Из всех вычисленных показателей W_j номинальных потоков через сечения $\&_j\{x''_i\}$ выделяется минимальное значение

$$W_{max} \equiv \min(W_j), \quad j \equiv 1,2,...,J. \qquad (3.26)$$

Согласно теореме Форда-Фалкерсона, это значение является искомой величиной возможного максимального потока в анализируемой сети.

На рисунке 3.4 изображена дизъюнктивная СФЦ работоспособности и записана соответствующая ей система логических уравнений рассматриваемого примера (см. рисунки 1.1. и 1.2) потоковой электрической сети.



Система логических уравнений

y_1 Z *true*
y_2 Z y_{12} Ę y_{26} Ę y_{25}
y_3 Z y_{13}
y_4 Z y_{24}
y_5 Z y_{15} Ę y_{25}
y_6 Z y_{36} Ę y_{26}
y_7 Z y_{57} Ę y_{47} Ę y_{67}
y_{67} Z x_{67} ė y_6
y_{57} Z x_{57} ė y_5
y_{47} Z x_{47} ė y_4
y_{36} Z x_{36} ė y_3
y_{26} Z x_{26} ė (y_2 Ę y_6)
y_{25} Z x_{25} ė (y_2 Ę y_5)
y_{24} Z x_{24} ė y_2
y_{13} Z x_{13} ė y_1
y_{15} Z x_{15} ė y_1
y_{12} Z x_{12} ė y_1

Рисунок 3.4 – Дизъюнктивная СФЦ электрической потоковой сети

В соответствии с п.4 разработанной методики, на основе системы логических уравнений заданной в примере дизъюнктивной СФЦ (см. рисунок 3.4) по инверсному ЛКФ $\boldsymbol{Yo}$ Z $\boldsymbol{y''_7}$ (не реализации суммарного выходного потока мощности) с помощью УГМ комбинаторного ОЛВМ [7, 9] определяется логическая функция, представляющая 18 минимальных разрезов (сечений отказов) рассматриваемой потоковой электрической сети. Они приведены в столбцах 2 и 5 таблицы 3.10.

В столбцах 3 и 6 таблицы 3.10 приведены значения пропускной мощности $\boldsymbol{W_j}$ отдельных минимальных разрезов $\boldsymbol{\&_j \{ x''_i \}}$, вычисленные на основе выражения (3.25) п.5 разработанной методики.

Таблица 3.10 – Состав МСО и соответствующие пропускные потоки мощности сечений электрической сети

№ j	МСО $\&_j \{ x''_i \}$	W_j (МВт)	№ j	МСО $\&_j \{ x''_i \}$	W_j (МВт)
1	*2*	***3***	*4*	*5*	***6***
1	$x''_{13}\ x''_{12}\ x''_{15}$	900	10	$x''_{57}\ x''_{26}\ x''_{24}\ x''_{13}$	850
2	$x''_{36}\ x''_{12}\ x''_{15}$	850	**11**	$\boldsymbol{x''_{36}\ x''_{57}\ x''_{26}\ x''_{24}}$	**800**
3	$x''_{67}\ x''_{26}\ x''_{12}\ x''_{15}$	1050	**12**	$\boldsymbol{x''_{67}\ x''_{57}\ x''_{24}}$	**800**
4	$x''_{57}\ x''_{25}\ x''_{13}\ x''_{12}$	1400	13	$x''_{47}\ x''_{26}\ x''_{25}\ x''_{13}\ x''_{15}$	1000
5	$x''_{36}\ x''_{57}\ x''_{25}\ x''_{12}$	1350	14	$x''_{36}\ x''_{47}\ x''_{26}\ x''_{25}\ x''_{15}$	950
6	$x''_{67}\ x''_{57}\ x''_{26}\ x''_{25}\ x''_{12}$	1550	15	$x''_{67}\ x''_{47}\ x''_{25}\ x''_{15}$	950
7	$x''_{26}\ x''_{25}\ x''_{24}\ x''_{13}\ x''_{15}$	950	16	$x''_{57}\ x''_{47}\ x''_{26}\ x''_{13}$	900
8	$x''_{36}\ x''_{26}\ x''_{25}\ x''_{24}\ x''_{15}$	900	17	$x''_{36}\ x''_{57}\ x''_{47}\ x''_{26}$	850
9	$x''_{67}\ x''_{25}\ x''_{24}\ x''_{15}$	900	18	$x''_{67}\ x''_{57}\ x''_{47}$	850

Выполнение п.6 методики позволяет выделить два МСО ($\boldsymbol{j}$ = 11 и 12), которые имеют одинаковое минимальное значение потоков (3.27)

$$W_{max} \text{ Z } W_{11} \text{ Z } W_{12} \text{ Z } 800\ MBm:$$
$$\&_{11}\{x''_i\} \text{ Z } x''_{36} \text{ ė } x''_{57} \text{ ė } x''_{26} \text{ ė } x''_{24}; \qquad (3.27)$$
$$\&_{12}\{x''_i\} \text{ Z } x''_{67} \text{ ė } x''_{57} \text{ ė } x''_{24}.$$

Этот результат совпадает с решением данной задачи, приведенным в [33, с.75], что подтверждает **корректность** разработанной методики реализации в СЛМ РП известной теоремы Форда-Фалкерсона определения максимального потока в сети на основе МСО, формируемых с помощью ОЛВМ.

3.2.2 Моделирование и расчет рабочего потока в сети

Характерными особенностями процессов функционирования потоковых систем являются периодические рабочие изменения их структуры (направлений и показателей распределения потоков), детерминированных и вероятностных параметров элементов. Поэтому разработка методов и средств учета этих изменений при моделировании и расчете показателей потоковых систем является важным фактором обеспечения возможности выработки и обоснования эффективных управленческих решений в процессе разработки и эксплуатации сложных системных объектов и процессов с сетевой структурой. В данном разделе выполнена разработка основных положений методики структурно-логического моделирования и расчета показателей рабочих потоков, определяющих текущую заданную организацию работы потоковой сети.

I Постановка задачи моделирования и расчета показателей рабочего потока в сети.

Общая постановка этой задачи (см. §1.2.2) предусматривает задание следующего состава основных исходных данных:

1 Графа $G(X,Y)$ сетевой СФЦ, определяющего исследуемый вариант организации взаимосвязей элементов и подсистем в потоковой сети. Специальными метками ***sp(i)*** в СФЦ отмечаются три вида элементов:

- $sp(i) \text{ Z } 1$ – генерирующие элементы (источники потоков);
- $sp(i) \text{ Z } 2$ – передающие элементы потоковой сети;

- $sp(i) \in 3$ – потребители (нагрузочные элементы).

2 Логического критерия функционирования (2.13), определяющего общее условие реализации рассматриваемого режима работы потоковой сети.

3 Числовых значений следующих параметров элементов потоковой сети:

- wn_i – нормативные (верхние предельные) потоковые параметры всех элементов (генерирующих, передающих и потребителей) ПС;

- w_i – рабочие (текущие) потоковые параметры генерирующих ($sp(i) \in 1$) и передающих ($sp(i) \in 2$) элементов сети;

- s_i – значения аддитивных параметров (стоимости, протяженности, сопротивления, и др.) всех элементов потоковой сети.

На рисунке 3.5 изображена сетевая СФЦ одного из возможных вариантов структурного построения рассматриваемого примера электрической потоковой сети (см. рисунки 1.1, 1.2) с заданными направлениями коммутации потоков и значениями текущих рабочих и нормативных параметров элементов.

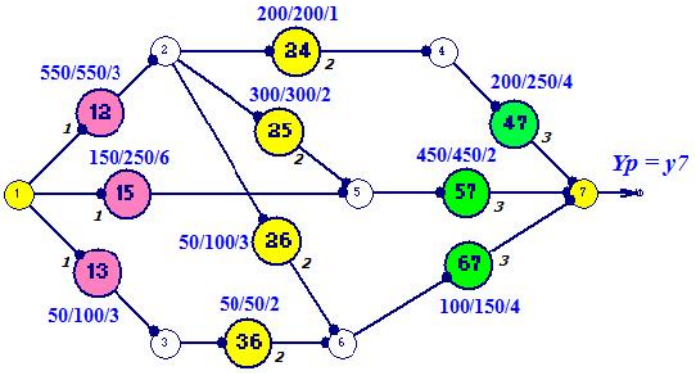


Рисунок 3.5 – Пример СФЦ электрической потоковой сети

В записях, размещенных около функциональных вершин СФЦ, указаны заданные значения исходных параметров каждого элемента ПС:

$$w_i \text{ – рабочий поток} / wn_i \text{ – нормативный поток} / s_i \text{ – стоимость} \qquad (3.28)$$

Элементы 12, 15 и 13 являются генераторами (источниками, код *sp(12) = sp(15) = sp(13) = 1*), элементы 47, 57 и 67 являются потребителями (нагрузками, код *sp(47) = sp(57) = sp(67) = 3*), элементы 24, 25, 26, и 36 являются передающими (код *sp(24) = sp(25) = sp(26) = sp(36) = 2*).

Разрабатываемая методика СЛМ РП рабочего потока должна позволять на

основе указанных исходных данных строить математические модели и вычислять взаимосвязанный комплекс показателей результативности функционирования заданного варианта построения сети.

II Построение логической модели функционирования ПС

1 Логическая модель функционирования ПС формируется с помощью разработанного ранее СГМ последовательностей событий (см. главу 2) и представляется в виде сетевой ФАЛ – $\boldsymbol{Y_C}$.

2 Эта функция с помощью сетевых конъюнкций $\boldsymbol{L_k}$ Č$\boldsymbol{Yc}$, $k=1,2,\ldots,K$ представляет все последовательные пути, по которым осуществляется совместное распределение потоков от истока к стоку моделируемой сети. Так, для рассматриваемого примера на основе СФЦ, изображенной на рисунке 3.5, по ЛКФ $\boldsymbol{Yc}$ Z $\boldsymbol{y_7}$ с помощью СГМ ПС построена сетевая аналитическая модель (3.29).

$$\boldsymbol{Y_C} \text{ Z } \boldsymbol{y_7} \text{ Z } \left|\begin{array}{ccccc} \boldsymbol{x_{12}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{24}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{47}} \\ \boldsymbol{x_{12}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{25}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{57}} \\ \boldsymbol{x_{15}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{57}} & & \\ \boldsymbol{x_{13}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{36}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{67}} \\ \boldsymbol{x_{13}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{36}} & \text{ì} & \boldsymbol{x_{67}} \end{array}\right| \begin{array}{c} \boldsymbol{L_1} \\ \boldsymbol{L_2} \\ \boldsymbol{L_3} \\ \boldsymbol{L_4} \\ \boldsymbol{L_5} \end{array} \qquad (3.29)$$

Модель (3.29) представляет собой одну конъюнкцию $\boldsymbol{Y_C}$ сетевой ФАЛ, состоящую из пяти логических последовательностей $\boldsymbol{L_k}$ Č$\boldsymbol{Yc}$, k=1,2,…,5, которые в совокупности точно определяют все действующие направления потоков в сети. Логическая полнота и точность сетевых ФАЛ позволили разработать методики вычисления на их основе показателей результативности функционирования ПС.

III Расчет показателей отдельных путей ПС

На основе сформированной с помощью СГМ ПС аналитической маршрутной модели (сетевой ФАЛ) и заданных параметров элементов, разрабатываемая методика СЛМ РП потоковой сети должна вычислять следующие основные показатели результативности функционирования ПС.

1) Рабочий поток $\boldsymbol{W_{Rk}}$ отдельного ***k****-го* пути ПС определяется минимальным из заданных значений $\boldsymbol{w_i}$ рабочих потоков всех элементов ***i***, входящих в этот путь, следовательно:

$$\boldsymbol{W_{Rk}} \text{ Z } \boldsymbol{min(\, w_i \,)}, \; i \text{ Č } L_k, \; k = 1, 2, \ldots, K. \qquad (3.30)$$

2) Нормативный поток W_{Nk} отдельного ***k**-го* пути ПС определяется минимальным из заданных значений wn_i нормативных потоков всех элементов ***i***, входящих в этот путь, следовательно:

$$W_{Nk} = \min(wn_i),\ i \in L_k,\ k = 1, 2, \ldots, K. \qquad (3.31)$$

3) Из п.3.1 и п.3.2 следует, что резерв потока R_W_k каждого отдельного ***k**-го* пути ПС определяется разностью

$$R_W_k = W_{Nk} - W_{Rk},\ k = 1, 2, \ldots, K. \qquad (3.32)$$

4) Стоимость (протяженность, сопротивление) каждого отдельного ***k**-го* пути ПС является аддитивным показателем, поэтому

$$S_k = \sum_{i \in L_k} s_i,\ k = 1, 2, \ldots, K. \qquad (3.33)$$

В правой части (11) приведены вычисленные на основе правил (3.30) – (3.33) значения указанных показателей для каждого из пяти разных путей рассматриваемого примера электрической ПС (см. рисунок 3.5).

$$\begin{array}{l}
L_1 = x_{12} \cup x_{24} \cup x_{47} : W_{R1} = 200 / W_{N1} = 200\ (R_W_1 = 0) \quad S_1 = 8 \\
L_2 = x_{12} \cup x_{25} \cup x_{57} : W_{R2} = 300 / W_{N2} = 300\ (R_W_2 = 0) \quad S_2 = 7 \\
L_3 = x_{15} \cup x_{57} : W_{R3} = 150 / W_{N3} = 250\ (R_W_3 = 100) \quad S_3 = 8 \\
L_4 = x_{13} \cup x_{36} \cup x_{67} : W_{R4} = 50 / W_{N4} = 50\ (R_W_4 = 0) \quad S_4 = 9 \\
L_5 = x_{12} \cup x_{26} \cup x_{67} : W_{R5} = 50 / W_{N5} = 100\ (R_W_5 = 50) \quad S_5 = 10
\end{array} \qquad (3.34)$$

IV Расчет общих показателей ПС

Разработаны правила расчета следующих показателей потоковых сетей:

1 Действующие суммарные рабочие потоки элементов x_i ПС

$$w_i = \sum_{k / x_i \in L_k} W_{Rk},\ i = 1, 2, \ldots, H. \qquad (3.35)$$

2 Резервы действующих суммарных рабочих потоков элементов x_i ПС

$$R_x_i = wn_i - w_i,\quad i = 1, 2, \ldots, H. \qquad (3.36)$$

3 Суммарный рабочий поток всей сети

$$SWr = \sum_{k=1}^{K} W_{Rk}. \qquad (3.37)$$

4 Резерв суммарного рабочего потока всей сети

$$R_SW = \sum_{k=1}^{K} W_{Rk} - SWr. \qquad (3.38)$$

Результаты данного завершающего этапа расчетов общих показателей результативности рассматриваемого примера построения электрической ПС (см. рисунок 3.5), выполненные по правилам (3.35) – (3.38), приведены в (3.39).

$$
\begin{array}{l}
x_{36}: \ w_i = 50; \quad R_x_i = 0; \\
x_{67}: \ w_i = 100; \quad R_x_i = 50; \\
x_{57}: \ w_i = 450; \quad R_x_i = 0; \\
x_{47}: \ w_i = 200; \quad R_x_i = 50; \\
x_{26}: \ w_i = 50; \quad R_x_i = 50; \\
x_{25}: \ w_i = 300; \quad R_x_i = 0; \\
x_{24}: \ w_i = 200; \quad R_x_i = 0; \\
x_{13}: \ w_i = 50; \quad R_x_i = 50; \\
x_{12}: \ w_i = 550; \quad R_x_i = 0; \\
x_{15}: \ w_i = 150; \quad R_x_i = 100; \\
SWr \ Z \ 750 \\
R_SW \ Z \ 150
\end{array}
\qquad (3.39)
$$

Таким образом, выполненные в данном разделе диссертации разработки методик СЛМ РП сетевых планов работ и потоковых сетей доведены до алгоритмического уровня и реализованы в специальном разделе программного комплекса "ПК АСМ ЛВДМ" [54, глава 4 диссертации]. Это позволяет расширить область применения разработанных методов и решать задачи структурно-логического моделирования и расчета показателей сетей большой размерности высокой структурной сложности. Пример применения разработанной методики для анализа сетевого плана работ приведен в разделе 4.5.1 диссертации.

3.3 Разработка методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы

В данном разделе приведены результаты разработки *методики структурно-логического моделирования* (СЛМ) последствий *изменений состояний системы* (ИСС), возникающих в процессе ее функционирования вследствие, например, отказов, поражений или отключений различных групп элементов и подсистем. Эта задача актуальна при структурно-логическом моделировании и расчете показателей свойств результативности и устойчивости функционирования сложных и высокоразмерных системных объектов в процессе их эксплуатации.

Как отмечено в §1.2.2, существующие логико-вероятностные методы, включая ОЛВМ, разрабатывались и используются в основном на предварительных стадиях выполнения научных исследований и проектных разработок. В этих случаях традиционной и обоснованной при моделировании и расчете показателей является гипотеза о том, что в начальный момент времени (***t=0***) своего функционирования система достоверно находится только в одном, так называемом, основном начальном состоянии

$$x_{i_{tZ0}} \; Z \; I(true), \; i = 1, 2, \ldots N, \qquad (3.40)$$

где N – общее число функциональных и фиктивных вершин СФЦ. Если, например, СФЦ является монотонной и представляет условия работоспособности системы в целом, то основное начальное состояние (3.40) означает, что в начальный момент времени функционирования все элементы моделируемой системы достоверно работоспособны. Это приемлемо и широко применяется при моделировании и расчете показателей систем на стадии их проектирования.

Однако на стадии эксплуатации функционирующая система периодически меняет свое текущее состояние в результате, например, отказов и восстановлений элементов, поражений их внешними воздействиями, плановыми отключениями и изменениями режимов функционирования. Поэтому для модельного обеспечения различных видов мониторинга результативности, устойчивости, риска процессов функционирования действующих сложных систем методы моделирования должны обеспечивать возможность корректного учета любых возникающих достоверных изменений начальных состояний структурно-сложных системных объектов и процессов.

3.3.1 Задание исходных данных для реализации методики СЛМ ИСС

Разрабатываемые правила выполнения методики СЛМ ИСС являются дальнейшим развитием ОЛВМ, теории, технологии и программных комплексов АСМ [7-9, 15, 18-20] в направлении, обеспечивающем возможность учета в структурных, логических, детерминированных и вероятностных аналитических моделях

любых изменений начальных состояний сложных систем.

Общее число возможных разных элементарных состояний системы, состоящей из H бинарных элементов, равно 2^H [9, с.80]. Одно из этих состояний, когда все элементы работоспособны (3.41), является в ОЛВМ основным и используется по умолчанию.

Разрабатываемая методика СЛМ ИСС должна позволять использовать при моделировании в качестве начального любое из всех возможных состояний системы. Поэтому основными исходными данными разрабатываемой методики СЛМ ИСС являются:

1 Граф $G(X,Y)$ СФЦ исследуемой системы, в котором:

– $x_i \in X$ – множество простых логических переменных реализации элементарных событий/работ, выполняемых элементами $i = 1, 2, .., H$ системы и представляемых в СФЦ функциональными вершинами;

– $y_j \in Y$ – множество выходных интегративных функций (2.1) функциональных и фиктивных вершин $j = 1, 2, .., N$ СФЦ;

– в общем случае, в СФЦ кроме H функциональных вершин (представляют элементы системы) могут входить фиктивные вершины, которые не представляют элементов, а используются для представления логических условий реализации функций подсистемами (группами элементов). Число фиктивных вершин в СФЦ равно $N - H$, а их собственная логическая переменная по определению [9, §1.4.2, выражение (1.15)] равна

$$x_i \notin I(true), \text{ для } x_i \in X. \qquad (3.41)$$

2 Множество $k \in nst$ номеров функциональных и фиктивных вершин СФЦ, соответствующие которым элементы и подсистемы достоверно перешли в состояния, противоположные состояниям вершин, указанным в СФЦ системы

$$x_{k_{tZ0}} \in false(x''_{k_{tZ0}} \in true), \; k \in nst. \qquad (3.42)$$

В монотонных моделях работоспособности, например, элементы и подсистемы, указанные в списке nst, считаются достоверно отказавшими (пораженными, отключенными) в течение всего периода времени t моделирования свойств систе-

мы. Все остальные элементы $l \in nst$ в начальный момент времени $t = 0$ считаются достоверно работоспособными (3.40) и в течение времени моделирования могут изменять свои состояния. Следует особо отметить, что в разрабатываемой методике СЛМ ИСС в список ***nst*** могут входить как номера функциональных вершин (элементов), так и номера фиктивных вершин (подсистем) СФЦ исследуемого объекта.

Основным результатом применения методики СЛМ ИСС является определение тех выходных системных (интегративных) функций y_j элементов и подсистем $j=1,2,\ldots,N$, которые достоверно не могут быть реализованы, т.е. эти элементы функционально отказали ($ФО_T$) вследствие возникновения любых комбинаций собственных отказов (отключений, поражений) заданной ***nst*** группы номеров функциональных и фиктивных вершин СФЦ, представляющих отдельные элементы и подсистемы.

3.3.2 Разработка основных этапов методики СЛМ ИСС с помощью численного решения систем логических уравнений

Реализация методики структурно-логического моделирования изменений состояний системы состоит из следующих этапов:

Этап 1. Записывается математически строгое представление графа $G(X,Y)$ схемы функциональной целостности с помощью системы логических уравнений. Для монотонных СФЦ работоспособности эта система уравнений имеет следующий общий вид.

$$G(X,Y) \Leftrightarrow \begin{cases} y_1 = x_1 \cdot f(y_j, j = 2,3,\ldots,N) \\ y_2 = x_2 \cdot f(y_j, j = 1,3,\ldots,N) \\ \ldots \\ y_i = x_i \cdot f(y_j, j = 1,2,\ldots,j-1, j+1,\ldots,N) \\ \ldots \\ y_N = x_N \cdot f(y_j, j = 1,2,\ldots,N-1) \end{cases}. \qquad (3.43)$$

В форме (3.43) записи системы логических уравнений СФЦ указываются обозначения x_i всех логических переменных функциональных вершин. Для всех

фиктивных вершин $x_i = true$, поэтому их запись в соответствующих уравнениях (3.43) может не производиться.

Этап 2. Задается множество ***nst*** достоверно отказавших (пораженных, отключенных) элементов системы.

Этап 3. Выполняется подстановка в уравнения (3.43) значений логического нуля (***O***, ***false***) вместо всех простых логических переменных x_i тех функциональных вершин СФЦ, номера ***i*** которых указаны в списке (3.42) ***nst*** (в соответствующих уравнениях x_i заменяется на ***O***).

Выполняется подстановка в уравнения (3.43) значений логической единицы (***I***, ***true***) вместо всех простых логических переменных x_i тех функциональных вершин СФЦ, номера ***i*** которых не указаны в списке (3.42) ***nst*** (x_i заменяется на ***I***).

Для фиктивных вершин, номера ***j*** которых указаны в списке ***nst*** (3.42), на логический ***O*** заменяются обозначения соответствующих интегративных функций y_j в правых частях уравнений (3.43).

Этап 4. Методом последовательной подстановки выполняется пошаговое (итерационное) численное решение системы логических уравнений (3.43). Суть его состоит в том, что вычисленные на текущем шаге итерации значения $y_i = I / O$ подставляются в правые части остальных, еще не вычисленных уравнений системы. Затем выполняется следующий итерационный шаг вычислений. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут вычислены значения ***I/O*** всех интегративных функций y_i системы уравнений (3.43).

$$G(X,Y) = \begin{cases} y_1 = I / O \\ y_2 = I / O \\ \ldots \\ y_i = I / O \\ \ldots \\ y_N = I / O \end{cases}. \qquad (3.44)$$

Этап 5. Полученные в (3.44) значения $y_i = O$ элементов и подсистем, не входящих в ***nst***, определяют множество $\{i\} \in ФО_T$ вершин СФЦ системы (функциональные и фиктивные), на выходах которых достоверно не реализуются их системные функции $y_i = O$, т.е. достоверно произошли *функциональные отказы*

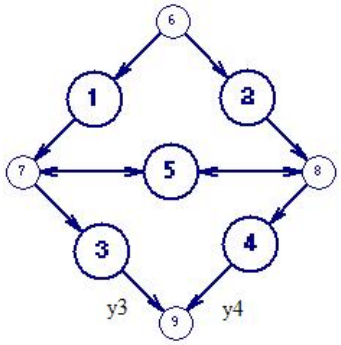
($\boldsymbol{ФО_T}$) вследствие возникших достоверных отказов (поражений, отключений) группы элементов и подсистем, указанных в ***nst***.

Этап 6. Полученные в (3.44) значения $y_j = I$ определяют те вершины ***j*** СФЦ системы (функциональные и фиктивные), элементы и подсистемы которых после возникновения событий ***nst*** сохранили свою функциональную работоспособность.

Применение разработанной методики СЛМ ИСС иллюстрируется следующим примером.

1 В соответствии с требованиями этапа 1 методики СЛМ ИСС, на рисунке 3.6 приведены:

- граф ***G(X,Y)*** монотонной СФЦ 5-ти элементной мостиковой системы;
- соответствующая СФЦ система логических уравнений.



Система логических уравнений

$y_1 = x_1 \vee y_6$
$y_2 = x_2 \vee y_6$
$y_3 = x_3 \vee y_7$
$y_4 = x_4 \vee y_8$
$y_5 = x_5 \vee (y_7 \wedge y_8)$
$y_6 = I$
$y_7 = y_1 \wedge y_5$
$y_8 = y_2 \wedge y_5$
$y_9 = y_3 \wedge y_4$

Рисунок 3.6 – СФЦ и система уравнений мостиковой системы

2 Задано множество ***nst*** номеров достоверно отказавших элементов рассматриваемой мостиковой системы:

$$nst = \{1,5\}; \tag{3.45}$$

3 Выполнение этапа 3 разработанной методики в рассматриваемом примере приводит к получению уравнений следующего вида

$$\begin{aligned}
&y_1 = O \vee y_6 = O\\
&y_2 = I \vee y_6 = y_6\\
&y_3 = I \vee y_7 = y_7\\
&y_4 = I \vee y_8 = y_8\\
&y_5 = O \vee (y_7 \wedge y_8) = O\\
&y_6 = I\\
&y_7 = y_1 \wedge y_5\\
&y_8 = y_2 \wedge y_5\\
&y_9 = y_3 \wedge y_4
\end{aligned} \tag{3.46}$$

4 Выполнение над (3.46) первого шага итерации вычислений этапа 4 методики приводит к получению следующего результата

$$
\begin{array}{l}
y_1 \text{ Z } O \\
y_2 \text{ Z } I \text{ ė } I \text{ Z } I \\
y_3 \text{ Z } y_7 \\
y_4 \text{ Z } y_8 \\
y_5 \text{ Z } O \\
y_6 \text{ Z } I \\
y_7 \text{ Z } O \text{ Ę } O \text{ Z } O \\
y_8 \text{ Z } y_2 \text{ Ę } O \text{ Z } y_2 \\
y_9 \text{ Z } y_3 \text{ Ę } y_4
\end{array}
\qquad (3.47)
$$

Выполнение над (3.47) второго шага итерационных вычислений согласно этапу 4 методики дает следующий результат

$$
\begin{array}{l}
y_1 \text{ Z } O \\
y_2 \text{ Z } I \\
y_3 \text{ Z } y_7 \\
y_4 \text{ Z } y_8 \\
y_5 \text{ Z } O \\
y_6 \text{ Z } I \\
y_7 \text{ Z } O \\
y_8 \text{ Z } I \\
y_9 \text{ Z } y_3 \text{ Ę } y_4
\end{array}
\qquad (3.48)
$$

Выполнение над (3.48) и далее действий, указанных в пункте 4 разработанной методики итерационных подстановок и вычислений, приводит к тому, что на пятом шаге формируется искомый детерминированный результат оценки последствий изменений (3.45) состояния рассматриваемой мостиковой системы.

В строках 1 и 2 столбца 5 таблицы 3.11 приведены непосредственные отказы функций y_1, y_5 элементов $i = 1, 5$, вошедших в заданное множество $nst = \{1, 5\}$.

5 В строках 4 и 7 столбца 5 таблицы 3.11 указаны интегративные функции $y_3 \text{ Z } O$ и $y_7 \text{ Z } O$, которые определяют элемент 3 и подсистему 7, на выходах которых возникли функциональные отказы вследствие $nst = \{1, 5\}$.

6 В строках 3, 4, 6, 8 и 9 столбца 5 таблицы 3.11 указаны интегративные функции $y_2 \text{ Z } y_4 \text{ Z } y_6 \text{ Z } y_8 \text{ Z } y_9 \text{ Z } I$, которые определяют элементы 2, 4 и подсистемы 6, 8 и 9, которые после возникновения заданного $nst = \{1, 5\}$ достоверно сохранили свою функциональную работоспособность.

7

Таблица 3.11 – Результаты этапа 4 пошаговой ручной методики СЛМ ИСС мостиковой системы

№	1	2	3	4	5
1	$y_1 = O$ и $y_6 = O$	$y_1 = O$	$y_1 = O$	$y_1 = O$	$y_1 = O$
2	$y_5 = O$ и $(y_7 \neq y_8) = O$	$y_5 = O$	$y_5 = O$	$y_5 = O$	$y_5 = O$
3	$y_2 = I \wedge y_6 = y_6$	$y_2 = I$	$y_2 = I$	$y_2 = I$	$y_2 = I$
4	$y_3 = I \wedge y_7 = y_7$	$y_3 = y_7$	$y_3 = O$	$y_3 = O$	$y_3 = O$
5	$y_4 = I \wedge y_8 = y_8$	$y_4 = y_8$	$y_4 = y_8$	$y_4 = I$	$y_4 = I$
6	$y_6 = I$	$y_6 = I$	$y_6 = I$	$y_6 = I$	$y_6 = I$
7	$y_7 = y_1 \vee y_5$	$y_7 = O \vee O = O$	$y_7 = O$	$y_7 = O$	$y_7 = O$
8	$y_8 = y_2 \vee y_5$	$y_8 = y_2 \vee O = y_2$	$y_8 = I$	$y_8 = I$	$y_8 = I$
9	$y_9 = y_3 \vee y_4$	$y_9 = y_3 \vee y_4$	$y_9 = y_3 \vee y_4$	$y_9 = y_3 \vee y_4$	$y_9 = I$

3.4 Разработка правил учета последствий изменений состояний в аналитических моделях и системных показателях

В общем случае детерминированное изменение начального состояния приводит к изменениям всех видов моделей, которые формируются в ОЛВМ комбинаторного и СГМ ПС сетевого моделирования.

1 Изменяется исходная СФЦ исследуемого системного объекта и соответствующая ей система логических уравнений. Новые СФЦ и СЛУ формируются путем исключения из исходных СФЦ и СЛУ всех вершин, уравнений и переменных, входящих во множества $\boldsymbol{nst}$ и $\boldsymbol{ФО_T}$ ($\boldsymbol{i} \in \boldsymbol{nst}$ и $\boldsymbol{j} \subset \boldsymbol{ФО_T}$).

2 Соответственно изменяются формируемые в ОЛВМ и СГМ аналитические математические модели – логические функции (комбинаторные и сетевые), многочлены расчетных вероятностных функций, методики вычислений детерминированных показателей.

3 Изменяются значения вычисляемых системных вероятностных и детерминированных показателей системы.

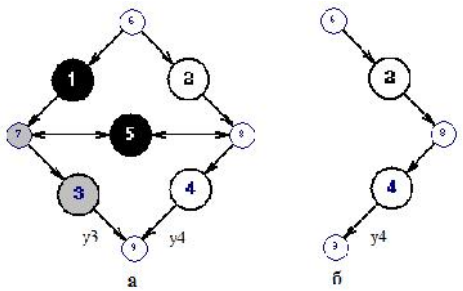
В данном разделе разрабатываются методические основы учета изменений начальных состояний системы в моделях и вычисляемых вероятностных показателях исследуемых структурно-сложных систем. Для наглядного представления в

СФЦ результатов применения методики СЛМ ИСС в настоящее время приняты следующие цветовые и структурные обозначения:

− темно-красным или черным цветом окрашивается фон тех вершин СФЦ, которые вошли в список множества $\boldsymbol{i} \in \boldsymbol{nst}$;

− светло-серым цветом окрашивается фон вершин СФЦ, вошедших в список множества $\boldsymbol{j} \check{C} \boldsymbol{ФО_T}$.

Так, результаты решения предыдущего примера (см. таблицу 3.11 столбец 5) с помощью разработанного СЛМ ИСС на графе СФЦ (см. рисунок 3.6) представляются в следующем виде



Система логических уравнений

y_2 Z x_2 ė y_6
y_4 Z x_4 ė y_8
y_6 Z I
y_8 Z y_2
y_9 Z y_4

Рисунок 3.7 – Варианты представления на СФЦ изменения состояния системы и его последствий

На рисунке 3.7.а черным цветом фона отмечены элементы 1 и 5 заданного ***nst*** (3.45). Серым фоном отмечены подсистема 7 и элемент 3 множества $\boldsymbol{ФО_T}$, которые достоверно перешли в состояния функционального отказа. Белым фоном отмечены элементы 2, 4 и подсистемы 6, 8, 9, которые сохранили свою функциональную работоспособность после возникновения ***nst*** (3.45). На рисунке 3.7.б изображен второй вариант преобразованной СФЦ, в котором удалены все элементы множеств ***nst*** и $\boldsymbol{ФО_T}$. Оба варианта СФЦ, изображенные на рисунке 3.7, аналитически представляются системой логических уравнений, которая получается путем удаления из исходной системы (см. рисунок 3.6) всех уравнений и переменных, вошедших во множества ***nst*** и $\boldsymbol{ФО_T}$.

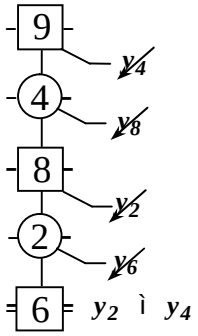
Комбинаторная и сетевая логические функции, учитывающие ИСС, могут быть получены двумя способами:

1 На основе преобразования логических моделей, полученных на основе исходной СФЦ, путем исключения в них всех логических переменных и интегра-

тивных функций, вошедших в ***nst*** и $\boldsymbol{ФО_T}$. В рассматриваемом примере (см. рисунок 3.7.а) для критерия $\boldsymbol{y_9}$ получаем

$$\begin{aligned} &Yc = y_9 = x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 \vee x_2 \cdot x_4 \vee x_1 \cdot x_4 \cdot x_5 = \\ &= O \cdot O \vee x_2 \cdot O \cdot O \vee x_2 \cdot x_4 \vee x_1 \cdot x_4 \cdot O = x_2 \cdot x_4 = x_2 \cdot x_4 . \end{aligned} \qquad (3.49)$$

2 Путем решения системы логических уравнений преобразованной СФЦ в рассматриваемом примере (см. рисунок 3.7.б) получаем



$$\begin{aligned} &Yc = x_2 \cdot x_4 \\ &Yk = x_4 \cdot x_2 . \end{aligned} \qquad (3.50)$$

Учет влияния изменения начального состояния системы на значение вероятностного показателя устойчивости системы в ОЛВМ также можно выполнить двумя способами:

1 Путем вычисления вероятностного показателя с помощью многочлена вероятностной функции (ВФ), полученного ранее [9, С. 132–148] на основе исходной СФЦ и полной ФРС, в процессе которого вероятности $\boldsymbol{p_i}$ элементов, вошедших в ***nst***, приравниваются к нулю, а вероятности $\boldsymbol{q_i}$ приравниваются к единице. В рассматриваем примере получаем (см. рисунок 3.6)

$$\begin{aligned} &Pc = p(Yc = y_9) = p(x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 \vee x_2 \cdot x_4 \vee x_1 \cdot x_4 \cdot x_5) = \\ &= p_1 p_3 \vee p_2 p_4 \vee q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 \vee p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 \vee p_1 p_2 p_3 p_4 . \end{aligned}$$

При $p_1 = p_5 = 0;\ \ q_1 = q_5 = 1$ получаем:

$$Pc = 0 \cdot p_3 \vee p_2 p_4 \vee 1 \cdot p_2 p_3 q_4 \cdot 0 \vee 0 \cdot q_2 q_3 p_4 \cdot 0 \vee 0 \cdot p_2 p_3 p_4 = p_2 p_4 .$$

2 Путем выполнения расчетов с помощью многочлена ВФ, полученного на основе логической ФРС, в которой уже учтено изменение начального состояния системы и его последствия. В примере это ФРС (3.49), (3.50), на основе преобразования которой [9, С. 132–144] определяется тот же многочлен ВФ

$$Pc = p(x_2 \cdot x_4) = p_2 p_4 . \qquad (3.51)$$

3.5 Разработка алгоритма и программной реализации методики СЛМ ИСС

В основе программной реализации разработанной методики структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы (СЛМ ИСС) в программном "ПК АСМ ЛВДМ" [54] лежит разработанная формализованная итерационная методика логического расчета значений ***0*** (функциональный отказ) или ***1*** (функциональная работоспособность) интегративных функций y_i выходов всех вершин СФЦ на основе системы логических уравнений и значений x_i начальных состояния всех элементов и подсистем, заданных ***nst*** (3.45).

НАЧАЛО

формализованной итерационной методики СЛМ ИСС

1 Вводятся два одномерных массива ***Yi _ sis _ 1 [1...i...N]*** и ***Yi _ sis _ 2 [1...i...N]*** , индексы ***i*** = 1 … *N* которых сопоставляются вершинам СФЦ (*N* равно числу функциональных и фиктивных вершин СФЦ). Хранящиеся в этих массивах коды ***0/1*** представляют вычисленные значения соответствующих интегративных функций y_i.

2 Значения **0/1**, хранящиеся в массиве ***Yi_sis_1***, определяют результаты расчетов значений y_i, полученные на предыдущем шаге итерации, а в массиве ***Yi_sis_2*** – результаты расчетов y_i на следующем (текущем) шаге итерации.

3 Перед началом итерационных вычислений в массив ***Yi_sis_1*** записываются все нули (0), а в массив ***Yi_sis_2*** – все единицы (1).

4 На текущем шаге итерации последовательно от ***i*** = *1* до ***i*** = *N* выполняются логические расчеты новых значений y_i массива ***Yi_sis_2***. Расчеты производятся по правилам, разработанным в основных положениях методики СЛМ ИСС (см. §3.2). В них учитываются правые части уравнений СФЦ, код начального состояния (***nst***) и результаты ***Yi_sis_1*** предыдущей итерации.

5 Если после завершения текущей итерации значения в ***Yi_sis_1*** и в ***Yi_sis_2*** не совпали, то результаты ***Yi_sis_2*** переписываются в ***Yi_sis_1*** и итерационные вычисления повторяются снова.

6 Если после завершения текущей итерации значения в ***Yi_sis_1*** и в ***Yi_sis_2*** полностью совпали, то расчеты прекращаются. Код, записанный в массиве ***Yi_sis_1*** (и в массиве ***Yi_sis_2***), полностью определяет новое функциональное состояние системы, являющееся достоверным следствием возникновения отказов (поражений, отключений) элементов и подсистем, указанных в ***nst***. Элементы и подсистемы ***i***, которые сохранили свою функциональную работоспособность, определяются по условию

$$Yi_sis_1[i] = 1 .$$

На графе СФЦ в "ПК АСМ ЛВДМ" эти вершины окрашиваются в белый цвет.

7 Элементы и подсистемы ***i***, которые достоверно отказали (поражены, отключены), определяются по прежнему условию (3.45)

$$i \in nst .$$

На графе СФЦ в "ПК АСМ ЛВДМ" эти вершины окрашиваются в темно-красный цвет.

8 Условием определения тех вершин СФЦ, которые соответствуют элементам и подсистемам, перешедшим вследствие ***nst*** в состояния функционального отказа, является

$$i \notin nst \text{ и } Yi_sis_1[i] = 0 .$$

На графе СФЦ в "ПК АСМ ЛВДМ" эти вершины окрашиваются в серый цвет.

КОНЕЦ

формализованной итерационной методики СЛМ ИСС

В таблице 3.12 приведено решение с помощью разработанной формализованной итерационной методики ранее рассмотренного примера (см. рисунок 3.6 и ***nst*** (3.45)) моделирования последствий отказов элементов ***i*** =1 и ***i*** =5 мостиковой системы.

Результаты ручной (см. таблицу 3.11, столбец 5) и формализованной (см. таблицу 3.12, столбцы 15 и 16) методик СЛМ ИСС совпали.

Таблица 3.12 – Пример пошаговой методики СЛМ ИСС

Начало				Шаг 1		Шаг 2		Шаг 3		Шаг 4		Шаг 5		Шаг 6	
G[x,y] (СЛУ СФЦ)	***NewNST***	***Yi_sis_1***	***Yi_sis_2***	***Yi_sis_1***	***Yi_sis_2***	***Yi_sis_1***	***Yi_sis_2***	***Yi_sis_1***	***Yi_sis_2***	***Yi_sis_1***	***Yi_sis_2***	***Yi_sis_1***	***Yi_sis_2***	***Yi_sis_1***	***Yi_sis_2***
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*
y_1 Z x_1 ė y_6	***0***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
y_2 Z x_2 ė y_6	***1***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***
y_3 Z x_3 ė y_7	***1***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
y_4 Z x_4 ė y_8	***1***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***1***	***1***	***1***	***0***	***0***
y_5 Z x_5 ė (y_7 Ę y_8)	***0***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
y_6 Z ***I***	***1***	***0***	***1***	***0***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***
y_7 Z y_1 Ę y_5	***1***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
y_8 Z y_2 Ę y_5	***1***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***	***1***
y_9 Z y_3 Ę y_4	***1***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***1***	***1***	***1***

На основе рассмотренной формализованной методики СЛМ ИСС разработаны машинный алгоритм и его программная реализация. Обобщенная структурная схема алгоритма СЛМ ИСС приведена на рисунке 3.8.

Программный код разработанного алгоритма методики СЛМ ИСС внедрен в программный комплекс "ПК АСМ ЛВДМ" [54].

На рисунке 3.9 приведены результаты автоматизированного моделирования с помощью "ПК АСМ ЛВДМ" [54] последствий отказов элементов 1 и 5 мостиковой системы, исходная СФЦ которой приведена на рисунке 3.6.

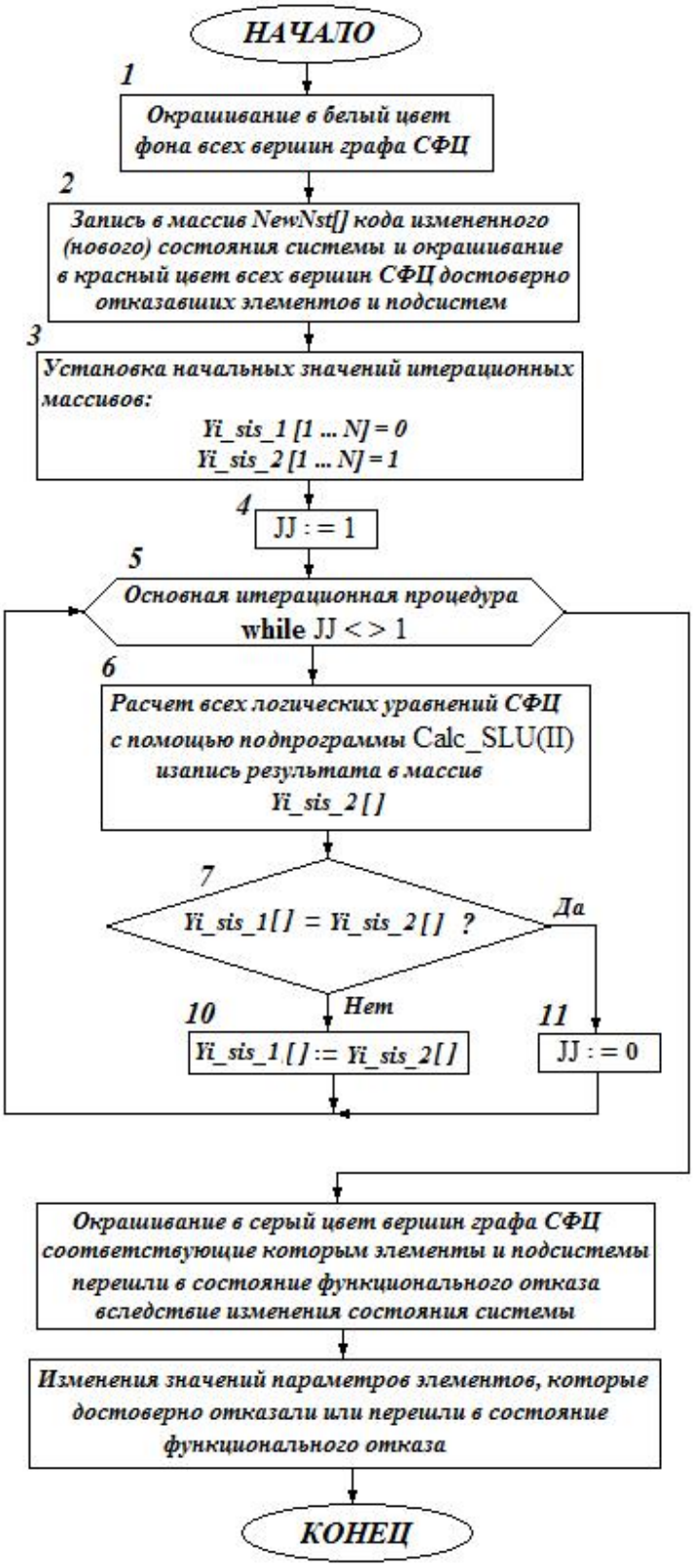


Рисунок 3.8 – Общий алгоритм программной реализации СЛМ ИСС

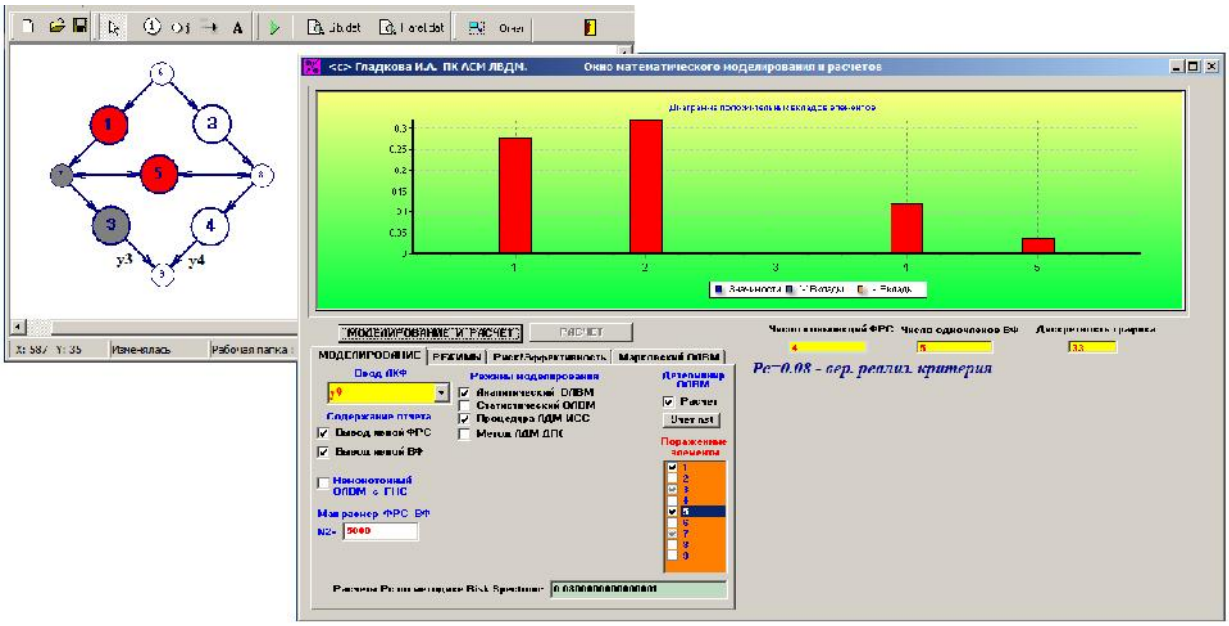


Рисунок 3.9 – Результаты автоматизированного СЛМ ИСС мостиковой системы

Полученные машинные результаты моделирования полностью совпали с результатами решения этой задачи с помощью ручной (см. таблицу 3.11) и формализованной (см. таблицу 3.12) методик СЛМ ИСС. Это подтверждает **адекватность** моделей, формируемых с помощью аппарата СФЦ, и **корректность** методики СЛМ ИСС.

Результаты разработки методики СЛМ ИСС и ее программной реализации [57] были внедрены в программный комплекс "АРБИТР" [18], который аттестован Ростехнадзором РФ и используется в промышленных, научных и учебных организациях для моделирования и расчета показателей надежности и безопасности различных системных объектов. Пример использования разработанной методики представлен в разделе 4.5.2.

Выводы по главе 3

При выполнении исследований, связанных с решением третьей частной научной задачи диссертации, были разработаны методики структурно-логического моделирования и расчета показателей для двух видов сетевых систем с учетом последствий изменений состояний:

- методики СЛМ РП систем сетевого планирования и управления [28-30];
- методики СЛМ РП потоковых сетей [31-35];
- методики СЛМ ИСС.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1 Разработанные в главе 2 диссертации общие правила представления с помощью СФЦ графов сложных систем с сетевой структурой и сформулированные в данном разделе дополнения к ним позволяют, без каких либо ограничений, представлять с помощью аппарата сетевых схем функциональной целостности все основные виды структурных схем сетевых планов работ и потоковых сетей.

2 Разработанный в диссертации сетевой графоаналитический метод последовательностей событий позволяет строить корректные аналитические модели (сетевые функции алгебры логики и специальные расчетные методики) для двух классов структурно-сложных сетевых системных объектов – сетевых планов работ и потоковых сетей различного назначения.

3 Разработаны основные разделы методики СЛМ РП сетевых планов работ:

- формализованной постановки задач анализа СП;
- построения аналитической модели СП в форме сетевой ФАЛ;
- выполнения расчетов двух групп показателей – показателей путей и работ СП.

4 Разработаны основные разделы методики СЛМ РП потоковых сетей:

- моделирования и расчета максимального потока в сети;
- моделирования и расчета показателей рабочего потока в сети.

Подтверждены адекватность представления с помощью СФЦ графов сетевых систем их прообразам и корректность разработанных методик расчетов показателей результативности двух классов сложных системных объектов с сетевой структурой – сетевых планов работ и потоковых сетей различного назначения.

5 Разработанная методика структурно-логического моделирования последствий изменений состояний системы включает в себя:

- правила структурно-логического моделирования изменений состояний системы;

− правила учета последствий изменений состояний системы в структурных, аналитических моделях, детерминированных показателях результативности и вероятностных показателях устойчивости систем.

6 Разработка методики СЛМ ИСС алгоритмизирована, доведена до программной реализации и внедрена:

− в программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами ("ПК АСМ ЛВДМ") [54];

− в промышленный образец программного комплекса "АРБИТР" [18], аттестованный к промышленному применению Ростехнадзором РФ.

7 Новизна результатов подтверждается отсутствием аналогов решения логико-вероятностными методами задачи моделирования структурно-сложных сетевых системных объектов – сетевых планов работ и потоковых сетей различного назначения.

8 Подтверждены адекватность представления с помощью СФЦ графов сетевых систем их прообразам и корректность расчетных методик количественной оценки результативности двух видов сложных системных объектов с сетевой структурой – сетевых планов работ и потоковых сетей различного назначения.

4 Программные средства, особенности проектирования, реализации и верификации структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой

4.1 Общие сведения о программных разработках

В настоящее время существует множество программных средств, позволяющих выполнять автоматизированное моделирование и расчет показателей структурно-сложных систем различного назначения. Условно, в рамках данной работы, их можно разделить на две группы – программные средства вероятностного анализа сложных систем, и программные средства детерминированного анализа. К первой группе относятся программные комплексы Risk Spectrum, Windchill, Cris, АРБИТР и др., ко второй – GraphMaker, СПУ2, RastrWin, РТП3 и др. Принципиальное отличие между ними в том, что они основываются на разных способах и формах исходной постановки задач и позволяют вычислять только определенный набор числовых характеристик.

4.2 История разработки комплекса

Экспериментальный образец программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами "ПК АСМ ЛВДМ" реализует технологию АСМ. Первые комплексы, реализующие данную технологию, разрабатывались одновременно с созданием и развитием аппарата СФЦ, ОЛВМ, теории и технологии автоматизированного структурно-логического моделирования [7, 8, 22, 66, 68].

Первые образцы программных комплексов АСМ были разработаны в Военно-морской академии в 1981-1984 гг. (алгоритмические языки АЛГОЛ, PL-1, ЭВМ БЭСМ-4, ЕС ЭВМ, автор Можаев А.С.). В этих комплексах для построения исходных структурных схем использовался аппарат СФЦ, автоматически строились монотонные и немонотонные логические модели, правильные многочлены

вероятностных функций, вычислялись точные значения вероятностных показателей устойчивости структурно-сложных систем, показатели значимостей, положительные и отрицательные вклады элементов.

Наиболее трудными оказались разработки для ПК АСМ методов, алгоритмов и программ автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций и многочленов вероятностных функций. На первую разработку фи полную отладку алгоритма и машинного программного модуля "LOG" (ЛОГ) универсального графоаналитического метода (УГМ) определения логических функций было потрачено несколько лет.

Не менее сложной оказалась первая разработка в ОЛВМ алгоритма и программного модуля преобразования логических функций в правильные расчетные многочлены вероятностных функций "WF" (ВФ).

В 2003 году на библиотеку программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ&ВФ) было получено свидетельство об официальной регистрации в Роспатенте РФ № 2003611100 [20, Приложение 2]. В 1992-1993 гг. был разработан "Программный комплекс автоматизированного логико-вероятностного моделирования и расчета показателей надежности" (ПК АЛВМ, автор Гладкова И.А., ЛЭТИ). Работал комплекс под ОС MS DOS.

В 1999 г. Воронцовым В.Ю. (ВМА, научный руководитель Можаев А.С.) был разработан "Интерфейс визуального построения схем функциональной целостности для ПК АСМ версия 5.0". Этой работой было положено начало перевода ПК АСМ версия 5.0 с ОС MS DOS на ОС MS Windows. Окончательно этот перевод был завершен в 2001 г. созданием программного комплекса "ПК АСМ 2001", на который в 2003 г. было получено свидетельство об официальной регистрации в Роспатенте РФ № 2003611099 [19, Приложение 3]. В качестве основного аппарата автоматического моделирования в "ПК АСМ 2001" (и во всех последующих) используется библиотека программных модулей "ЛОГ&ВФ". Этот комплекс является прототипом разработанного в диссертации "ПК АСМ ЛВДМ".

4.3 Программное средство "ПК АСМ ЛВДМ"

Полное наименование разработанного программного средства: "**Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами "ПК АСМ ЛВДМ**". Разработан как *Windows*-приложение с использованием: среды программирования *Borland Delphi Professional, Version7.0*; прототипа программного комплекса "ПК АСМ 2001" [19].

4.3.1 Назначение программного комплекса "ПК АСМ ЛВДМ"

Комплекс предназначен для **детерминированного** и **вероятностного** моделирования и расчета показателей свойств **результативности** функционирования сложных систем с сетевой структурой (сетевых планов работ и потоковых сетей) и **устойчивости** функционирования (надежности, живучести, безопасности и технического риска) высокоразмерных структурно-сложных систем.

Теоретической и методической основой Комплекса является **общий логико-вероятностный метод** [7, 9, 66, 68], технология автоматизированного структурно-логического моделирования [8], **сетевой графоаналитический метод** последовательностей событий [9, 43, 45] и методики расчетов показателей результативности сетевых планов и потоковых сетей с учетом изменений состояний.

4.3.2 Основные этапы работы программного комплекса

Реализованные в программном комплексе ОЛВМ, СГМ технология АСМ предусматривают последовательное выполнение следующих трех этапов:

I Постановки задачи, включающей подготовку и ввод в "ПК АСМ ЛВДМ":

− структурной модели исследуемого свойства системы, представленной в виде сетевой и/или комбинаторной **схемы функциональной целостности** (СФЦ) [7, 9, 66, 68];

− **логического критерия функционирования**, определяющего режим работы системы и форму представления исследуемого свойства;

− **детерминированных** и/или **вероятностных параметров элементов** исследуемой системы.

II Автоматического построения с помощью "ПК АСМ ЛВДМ" **сетевой** и/или **комбинаторной** логической **функции работоспособности системы**. Эта функция является детерминированной логической моделью исследуемого свойства результативности и/или устойчивости исследуемой системы. В зависимости от вида исходной СФЦ и формы заданного ЛКФ, формируемая "ПК АСМ ЛВДМ" ФРС представляет:

− при **сетевом детерминированном** моделировании – сетевые функции алгебры логики, в которых представляются последовательности и параллельности элементарных событий (работ);

− при **комбинаторном вероятностном** моделировании – кратчайшие пути успешного функционирования (КПУФ), либо минимальные сечения отказов (МСО) исследуемой системы, либо их различные немонотонные комбинации.

III Автоматического построения расчетных математических моделей в форме расчетных методик вычисления детерминированных показателей результативности функционирования СПР или ПС и/или точных или приближенных вероятностных функций оценки устойчивости.

4.4 Реализация "ПК АСМ ЛВДМ"

4.4.1 Графический интерфейс "ПК АСМ ЛВДМ"

Включение Комплекса осуществляется с помощью ярлыка "**ПК АСМ ЛВДМ"**, размещенного на рабочем столе, а также с помощью ссылки "**ПК АСМ ЛВДМ",** находящейся в меню **"Пуск. ПК АСМ ЛВДМ"**, на исполняемый файл, или включением самого исполняемого файла "**АСМ_ЛВДМ.exe**", находящегося в рабочей папке комплекса по адресу "**C:\Program Files (x86)\АСМ ЛВДМ\АСМ_ЛВДМ.exe**".

После включения Комплекса на экране монитора появляется временная заставка следующего вида

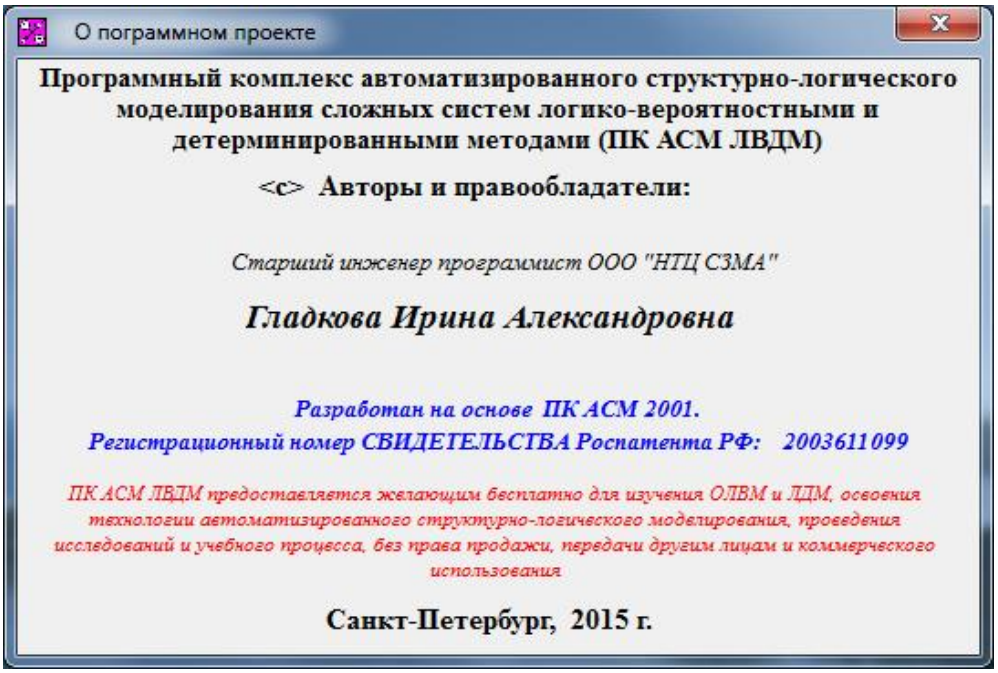


Рисунок 4.1 – Заставка "ПК АСМ ЛВДМ"

Для продолжения работы необходимо закрыть временную заставку, наведя указатель мыши и щелкнув на кнопке . После этого открывается рабочее "Окно ввода комбинаторных и сетевых СФЦ".

Работа пользователя с окном ввода СФЦ обеспечивается главным меню и быстрыми кнопками панели инструментов, расположенными в верхней части основного окна интерфейса пользователя (см. рисунок 4.2).

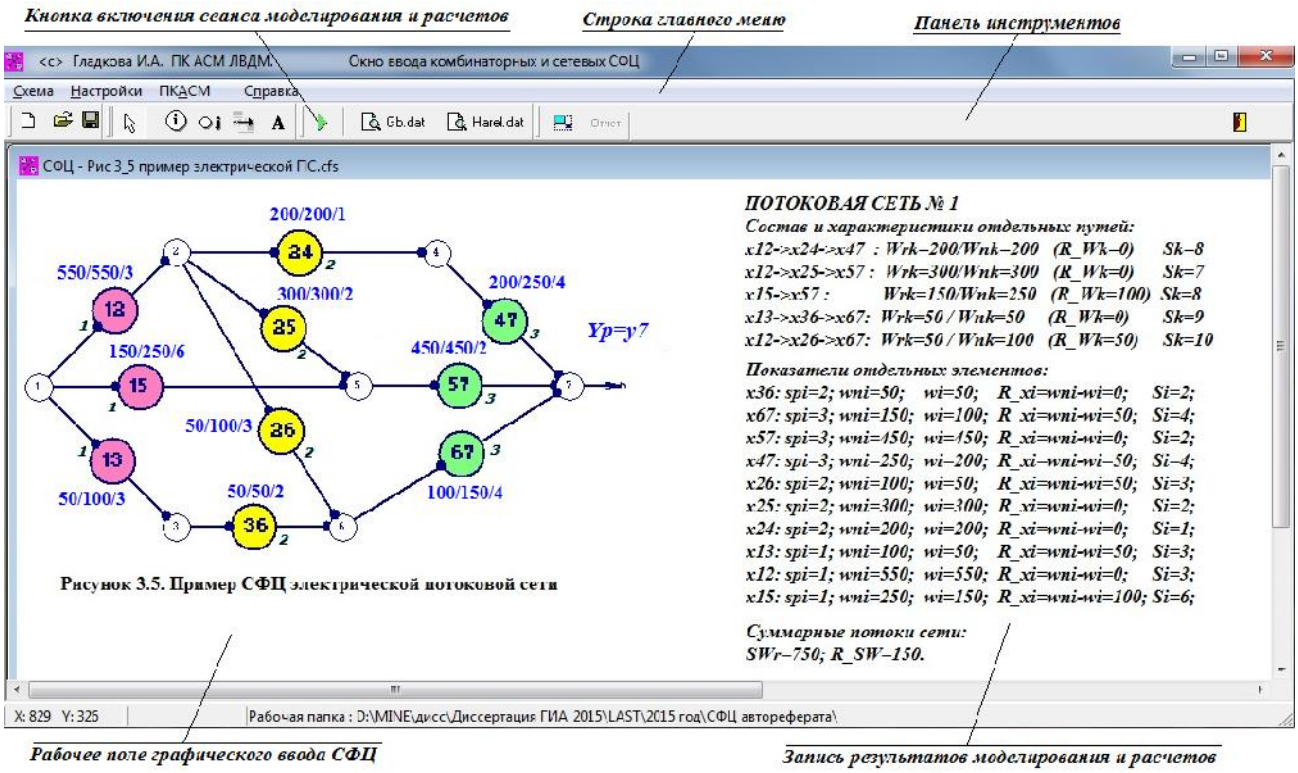


Рисунок 4.2 – Основное окно интерфейса пользователя "ПК АСМ ЛВДМ"

4.4.2 Структуры данных в "ПК АСМ ЛВДМ"

Для обеспечения возможности применения Комплекса пользователь должен подготовить следующие исходные данные:

I Изучить исследуемый объект и выбрать один из возможных подходов к построению структурной схемы исследуемого свойства результативности или устойчивости (надежности, живучести, безопасности или риска) функционирования системы.

II На основе формализованного событийно-логического подхода разработать сетевую или комбинаторную ***схему функциональной целостности*** исследуемого свойства ее результативности или устойчивости функционирования.

III Задать ***логический критерий функционирования*** (один или несколько). Совместно с СФЦ ЛКФ позволяет в обобщенной форме представить условия реализации исследуемого свойства функционирования рассматриваемого объекта в целом или его подсистем.

IV Определить значения детерминированных и/или вероятностных ***параметров элементов*** исследуемой системы.

Ввод детерминированных и вероятностных параметров элементов осуществляется с помощью специального рабочего окна, включаемого с помощью кнопки **"Harel.dat"**.

Файл Harel.dat

Номер вершины	Вероятность события	Ср.наработка до отказа	Ср. время восстановл.	Признак несовместн-ти	Код закона	Время работы	Кратность элемента	Параметр № 9	Параметр № 10	Параметр № 11	Параметр № 12	Описание события и выходной функции элемента
15	0.97	0	-1	0	1	0	1	1	150	6	250	Генератор 2
12	0.967	0	-1	0	1	0	1	1	550	3	550	Генератор 1
13	0.987	0	-1	0	1	0	1	1	50	3	100	Генератор 3
24	0.997	0	-1	0	1	0	1	2	200	1	200	Линия передачи 1
25	0.967	0	-1	0	1	0	1	2	300	2	300	Линия передачи 2
26	0.987	0	-1	0	1	0	1	2	50	3	100	Линия передачи 3
47	0.957	0	-1	0	1	0	1	3	250	4	250	Потребитель 1
57	0.947	0	-1	0	1	0	1	3	450	2	450	Потребитель 2
67	0.987	0	-1	0	1	0	1	3	150	4	150	Потребитель 3
36	0.97	0	-1	0	1	0	1	2	50	2	50	Линия передачи 4

СФЦ Записать Тві = 0.5

Рисунок 4.3 – Таблица ввода значений параметров элементов в "ПК АСМ ЛВДМ"

Необходимо нажать на кнопку "Записать", чтобы сохранить значения параметров. Также необходимо сохранить СФЦ исследуемой системы. Для этого надо сначала открыть специальное рабочее окно с помощью кнопки **"Gb.dat"**.

Файл Gb.dat

N	N1	H	N2	F
16	4	14	5000	5

Номер вершины	Тип вершины	Признак разнн-ти	№об.вер	Вид св.	№об.вер	Вид св.	№об.вер	Вид св.	№об.вер	Вид св.
1	1	0	100	102	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	101	0	0	0	0	0	0
3	1	0	2	101	0	0	0	0	0	0
7	1	0	3	101	0	0	0	0	0	0
9	1	0	7	101	0	0	0	0	0	0
10	1	0	9	101	0	0	0	0	0	0
11	1	0	9	101	0	0	0	0	0	0
12	1	0	10	101	0	0	0	0	0	0
13	1	0	12	101	11	101	8	101	5	101

Записать

Здесь в табличной форме представлена СФЦ системы. Нажав на кнопку "Записать", сохраняем ее на диске. После этого можно переходить к моделированию и расчету вероятностных и детерминированных показателей.

4.4.3 Основные окна "ПК АСМ ЛВДМ"

После ввода основных рабочих файлов СФЦ и параметров элементов исследуемой системы осуществляется включение кнопкой сеанса (режима) автоматизированого моделирования и расчетов "ПК АСМ ЛВДМ" (рисунок 4.4).

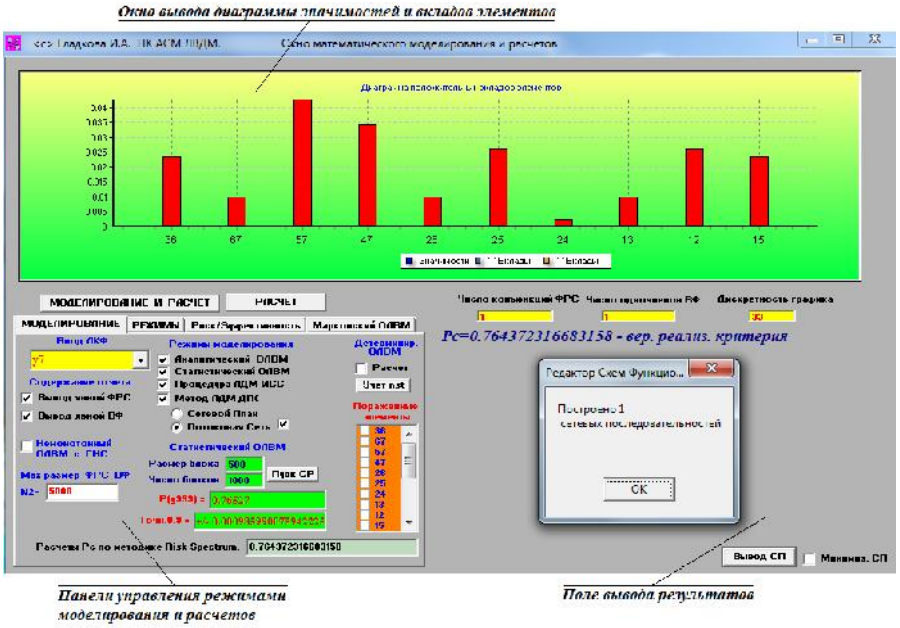
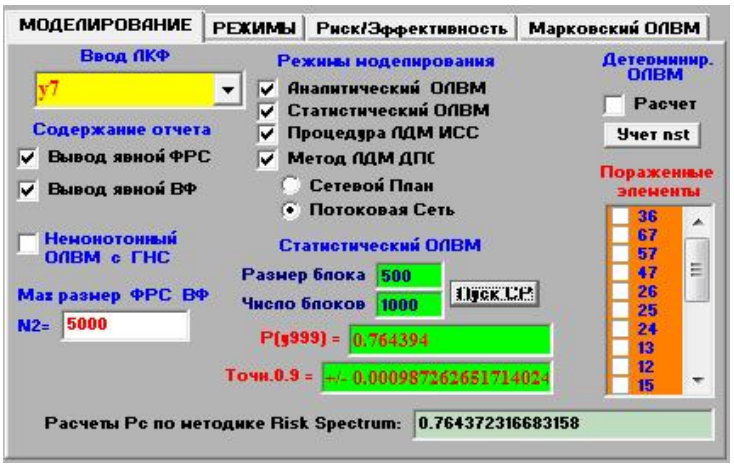


Рисунок 4.4 – Окно автоматизированного моделирования и расчетов

Перед началом работы необходимо задать параметры требуемого режима моделирования и расчетов. Это осуществляется с помощь четырех специальных панелей, размещенных в нижней левой части окна автоматизированного моделирования и расчетов "ПК АСМ ЛВДМ".

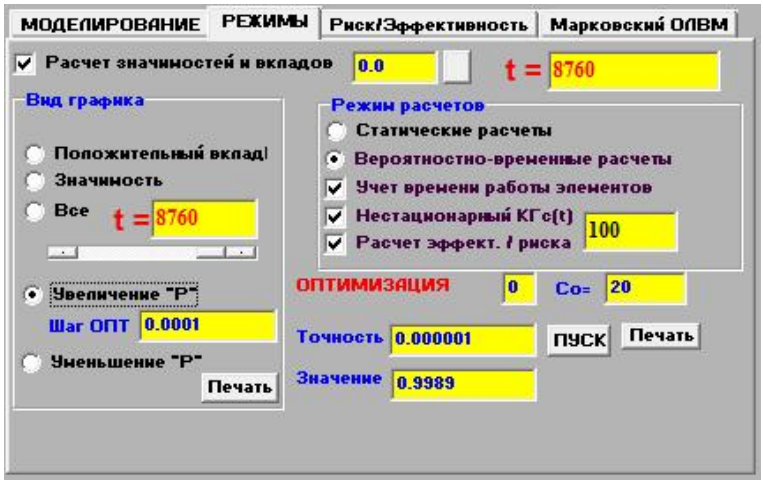
Указанные панели режимов моделирования имеют следующий вид и функциональное назначение.

I Панель "МОДЕЛИРОВАНИЕ":



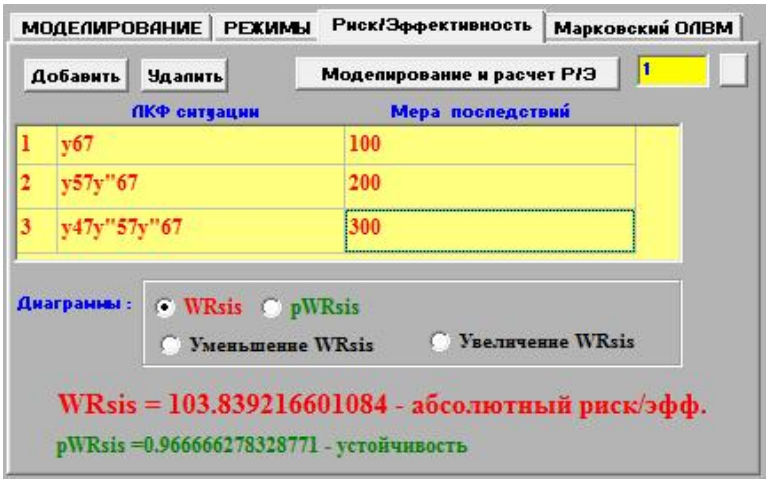
Режимы "Аналитический ОЛВМ" и "Статистический ОЛВМ" являются основными для выполнения вероятностного моделирования свойств устойчивости (надежности, живучести, безопасности и риска) систем, представляемых комбинаторными и сетевыми СФЦ.

II Панель "РЕЖИМЫ":



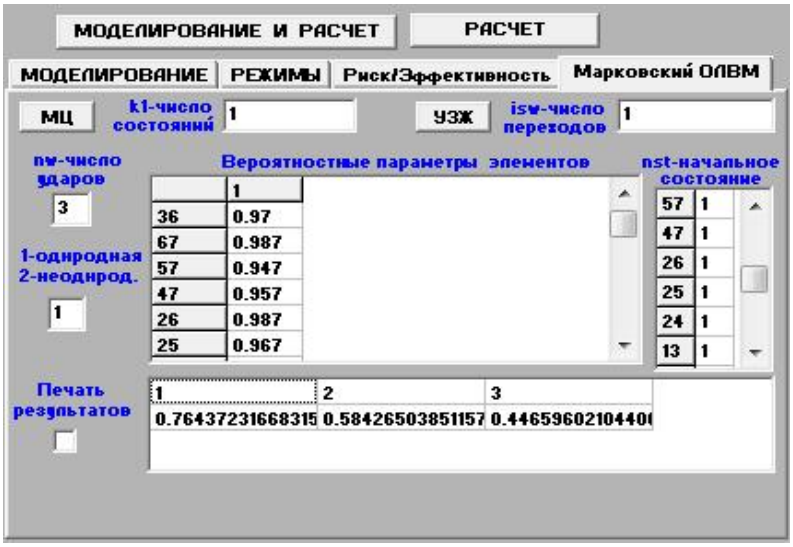
Инструменты данной панели предназначены для установки различных режимов работы "ПК АСМ ЛВДМ" по выполнению расчетов и разных вероятностных показателей и решению нескольких видов задач оптимизации.

III Панель "Риск/Эффективность":



С помощью этой панели вводятся дополнительные данные, выполняется моделирование и расчеты показателей эффективности, технического риска и ожидаемого ущерба качественно-сложных системных объектов и процессов.

IV Панель "Марковский ОЛВМ":



Эта панель предназначена для решения с помощью "ПК АСМ ЛВДМ" специального класса исследовательских задач, в основе которых лежит процесс автоматического построения вероятностных моделей систем в форме цепей Маркова.

Реализованные в "ПК АСМ ЛВДМ" режимы позволяют без ограничений использовать все ранее разработанные методы вероятностного моделирования и расчета показателей систем и новый сетевой графоаналитический метод и методики расчета показателей результативности функционирования систем сетевого планирования и потоковых сетей с учетом изменений состояний.

4.4.4 Основные результаты моделирования и расчетов детерминированных показателей результативности сложных систем

1 **Сетевая логическая функция алгебры логики** (сетевая ФАЛ) $\boldsymbol{L_k} \in \boldsymbol{Yc}$, в которой аналитически представляются все существующие варианты последовательностей и/или параллельностей элементарных или групповых событий (работ) сетевого системного объекта (сетевого плана или потоковой сети).

2 **Расчетные методики** и **вычисленные** значения следующих основных показателей **сетевых планов работ**:

− $\boldsymbol{T_k}$ – минимальные продолжительности отдельных последовательностей работ (путей) сетевого плана $\boldsymbol{Y_C}$;

- $T_{КП}$ – длительность критических путей реализации сетевого плана Y_C;
- R_k – запас времени каждого k-го не критического пути сетевого плана;
- $t_{P\text{-}H}(i)$ – ранний срок начала каждой i-й работы сетевого плана;
- $t_{P\text{-}O}(i)$ – ранний срок окончания каждой i-й работы сетевого плана;
- $t_{П\text{-}H}(i)$ – поздний срок начала каждой i-й работы сетевого плана;
- $t_{П\text{-}O}(i)$ – поздний срок окончания каждой i-й работы сетевого плана;
- $R_П(i)$ – полные резервы времени каждой i-й некритической работы;
- $R_C(i)$ – свободные (собственные) резервы времени каждой i-й работы.

3 **Расчетные методики** и **вычисленные** значения следующих основных показателей **потоковых сетей:**

- ***Yo*** – минимальная комбинаторная ФАЛ, представляющая все минимальные сечения потоковой сети;
- W_j – суммарный номинальный поток через j-е минимальное сечение ПС;
- ***Wmax*** – максимальный номинальный поток сети;
- W_{Rk} – рабочий поток каждого отдельного k-го пути ПС;
- W_{Nk} – нормативный поток каждого отдельного k-го пути ПС;
- R_W_k – резерв потока каждого отдельного k-го пути ПС;
- S_k – аддитивный показатель каждого k-го пути ПС;
- ***w_i*** – действующий суммарный рабочий поток через каждый элемент x_i ПС;
- R_x_i – резервы действующих суммарных рабочих потоков элементов x_i ПС;
- ***SWr*** – суммарный рабочий поток всей сети;
- ***R_SW*** – резерв суммарного рабочего потока всей сети.

4.4.5 Основные результаты моделирования и расчетов вероятностных показателей устойчивости систем

1 **Логическая функция работоспособности** (ФРС) системы в минимальной дизъюнктивной нормальной форме своего представления. В зависимости от постановки задачи (содержания и формы СФЦ и ЛКФ) автоматически формируемая "ПК АСМ ЛВДМ" ФРС может представлять логические условия безотказности или отказа, живучести или поражения, безопасности или аварии системы, а также различные уровни реализации этих свойств, включая различные условия риска функционирования.

2 **Многочлен расчетной вероятностной функции** (ВФ) исследуемого свойства системы.

3 **Значения** следующих вероятностных показателей исследуемого свойства системы:

− **статической** (независящей от времени) **вероятности реализации заданного критерия** функционирования исследуемой системы (безотказности, отказа, живучести, безопасности, риска и т.п.), вычисляемой на основе заданных статических вероятностей реализации элементарных событий (элементов);

− **вероятности безотказной работы** (или отказа) невосстанавливаемой системы в течение заданной наработки;

− **средней наработки до отказа** невосстанавливаемой системы;

− **коэффициента готовности** восстанавливаемой системы;

− **средней наработки на отказ** восстанавливаемой системы;

− **среднего времени восстановления** системы;

− **вероятности безотказной работы** (отказа) восстанавливаемой системы.

4 **Вероятность готовности** (неготовности) смешанной системы, состоящей из восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов.

5 **Значимость элементов** системы, равная абсолютному изменению значения вычисленной общесистемной вероятностной характеристики при изменении вероятности данного элементарного события от 0.0 до 1.0 включительно.

6 **Положительный вклад элементов** системы, равный абсолютному изменению значения вычисленной общесистемной вероятностной характеристики при изменении вероятности данного элементарного события от его текущего значения до 1.0 включительно.

7 **Отрицательный вклад элементов** системы, равный абсолютному изменению значения вычисленной общесистемной вероятностной характеристики при изменении вероятности данного элементарного события от его текущего значения до 0.0 включительно.

Все основные результаты моделирования и расчетов, определяемые "ПК АСМ ЛВДМ", выводятся на экран монитора и/или сохраняются в файле отчета **rezacm.lst**.

4.5 Примеры использования программного комплекса "ПК АСМ ЛВДМ"

4.5.1 Использование "ПК АСМ ЛВДМ" для расчета сетевых планов работ

В качестве примера рассматривается задача анализа опубликованного в [29] реального сетевого плана, разработанного трестом "Харьковоргтехстрой", для управления процессом строительства котельной. Сетевая СФЦ этого сетевого плана приведена на рисунке 4.5.

Данный сетевой план содержит **136** работ. Его автоматизированное моделирование и расчет всех показателей разработанным в диссертации СГМ ПС с помощью "ПК АСМ ЛВДМ" заняло менее одной секунды.

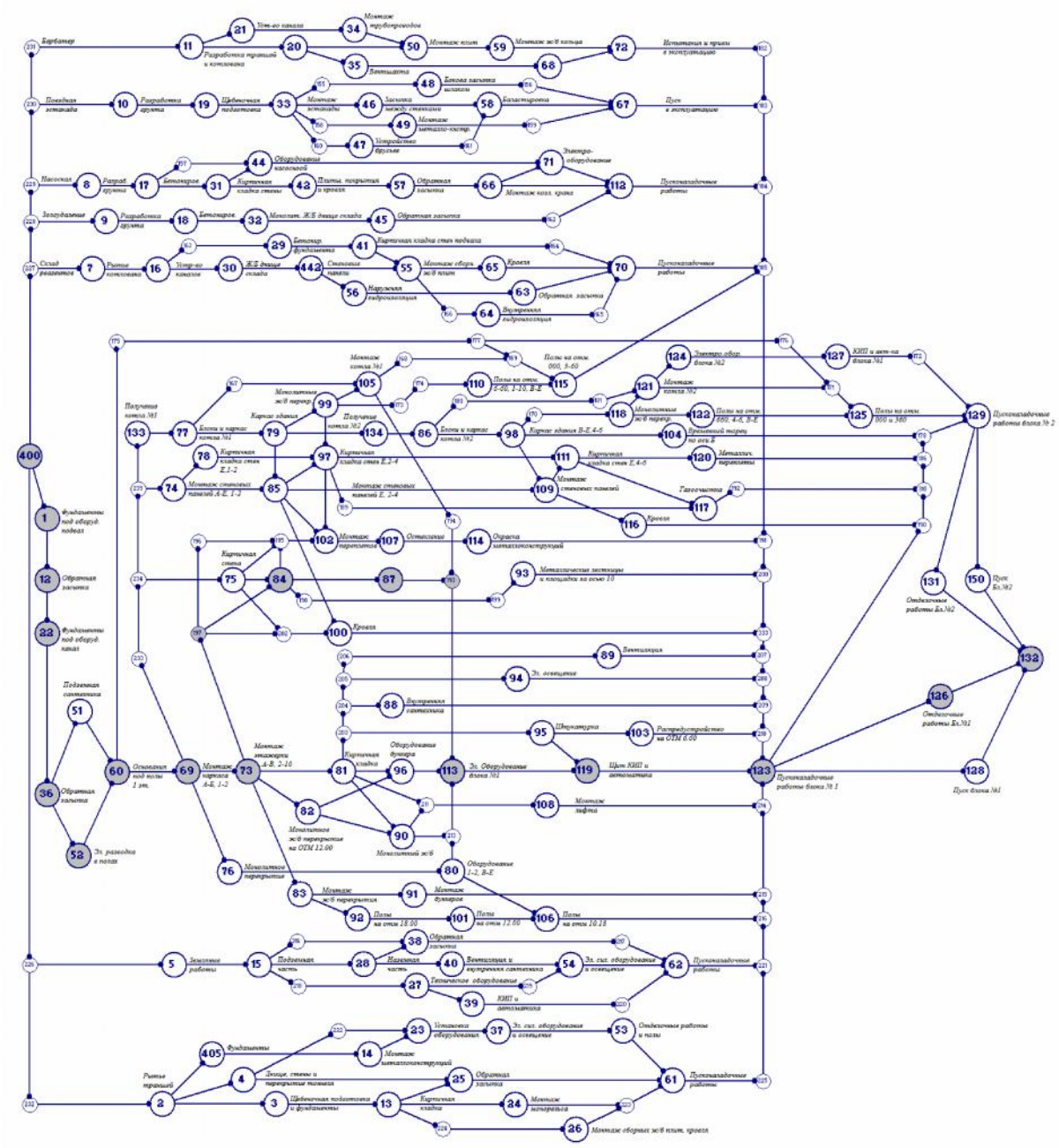


Рисунок 4.5 – СФЦ сетевого плана строительных работ

Получены следующие основные результаты моделирования и расчетов показателей результативности сетевого плана:

1 С помощью автоматического построения сетевой ФАЛ определены **548** различных путей (последовательностей) выполнения работ рассматриваемого сетевого плана и рассчитаны их продолжительности. Фрагмент результатов моделирования и расчетов показателей путей, полученных на основе разработанных СГМ ПС и методики СЛМ РП сетевых планов с помощью "ПК АСМ ЛВДМ", приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Фрагмент результатов моделирования путей примера СП

№ пути	Сетевая конъюнкция пути L_k	Продолжи-тельность пути TL_k [i]
1	x_{400} ì x_1 ì x_{12} ì x_{22} ì x_{36} ì x_{51} ì x_{60} ì x_{69} ì x_{73} ì ì x_{81} ì x_{95} ì x_{103} ì x_{123} ì x_{126} ì x_{132}	**455**
2	x_{400} ì x_1 ì x_{12} ì x_{22} ì x_{36} ì x_{52} ì x_{60} ì x_{69} ì x_{73} ì ì x_{81} ì x_{95} ì x_{103} ì x_{123} ì x_{126} ì x_{132}	**460**
3	x_{400} ì x_1 ì x_{12} ì x_{22} ì x_{36} ì x_{51} ì x_{60} ì x_{69} ì x_{73} ì ì x_{81} ì x_{88} ì x_{123} ì x_{126} ì x_{132}	**435**
- - -		
71	x_{400} ì x_1 ì x_{12} ì x_{22} ì x_{36} ì x_{51} ì x_{60} ì x_{69} ì x_{73} ì ì x_{84} ì x_{87} ì x_{113} ì x_{119} ì x_{123} ì x_{126} ì x_{132}	**530**
72	x_{400} ì x_1 ì x_{12} ì x_{22} ì x_{36} ì x_{52} ì x_{60} ì x_{69} ì x_{73} ì ì x_{84} ì x_{87} ì x_{113} ì x_{119} ì x_{123} ì x_{126} ì x_{132}	**535**
73	x_{400} ì x_1 ì x_{12} ì x_{22} ì x_{36} ì x_{51} ì x_{60} ì x_{69} ì x_{77} ì ì x_{105} ì x_{113} ì x_{119} ì x_{123} ì x_{126} ì x_{132}	**475**
- - -		
546	x_{400} ì x_2 ì x_3 ì x_{13} ì x_{26} ì x_{61} ì x_{123} ì x_{128} ì x_{132}	**191**
547	x_{400} ì x_2 ì x_{405} ì x_{14} ì x_{23} ì x_{37} ì x_{53} ì x_{61} ì x_{123} ì ì x_{128} ì x_{132}	**245**
548	x_{400} ì x_2 ì x_4 ì x_{23} ì x_{37} ì x_{53} ì x_{61} ì x_{123} ì x_{128} ì x_{132}	**215**

2 Определен критический путь данного сетевого плана $TL_{72} = 535$.

3 Вычислены показатели всех работ сетевого плана. Распечатка фрагмента результатов расчетов, полученных на основе разработанной методики СЛМ РП сетевых планов с помощью "ПК АСМ ЛВДМ", приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Фрагмент результатов расчетов показателей работ примера

№ раб i	Длит. раб. t_i	Ранние сроки		Поздние сроки		Резервы времени	
		начала $t_{PJH}(i)$	окончания $t_{PJO}(i)$	начала $t_{ПJH}(i)$	окончания $t_{ПJO}(i)$	полные $R_П(i)$	свободные $R_C(i)$
1	**30**	**90**	**120**	**90**	**120**	**0**	**0**
2	**20**	**90**	**110**	**345**	**430**	**255**	**0**
3	**16**	**110**	**26**	**414**	**470**	**304**	**0**
- - -							
73	**70**	**235**	**305**	**235**	**305**	**0**	**0**
74	**5**	**235**	**240**	**375**	**418**	**140**	**0**
75	**15**	**235**	**250**	**290**	**340**	**55**	**55**
- - -							
150	**10**	**520**	**530**	**525**	**535**	**5**	**5**
442	**3**	**110**	**113**	**414**	**472**	**304**	**0**
23	**10**	**155**	**165**	**410**	**455**	**255**	**0**
405	**5**	**110**	**115**	**365**	**405**	**255**	**0**
400	**90**	**0**	**90**	**0**	**90**	**0**	**0**

Опубликованные в [29] результаты анализа этого реального сетевого плана совпали с показателями, вычисленными с помощью разработанных в диссертации методов и расчетных методик, реализованных в "ПК АСМ ЛВДМ" [54]. Это является подтверждением **корректности** разработанных методов структурно-логического моделирования и расчета показателей потоковых систем.

4.5.2 Использование "ПК АСМ ЛВДМ" для учета последствий изменений состояний системы

В качестве следующего примера рассматривается задача мониторинга последствий изменений состояний главной водопроводной станции (ГВС) типовой структуры [21, 44], решение которой получено с помощью разработанной методики СЛМ ИСС.

На рисунке 4.6 изображен вариант СФЦ работоспособности варианта типовой структуры главной водопроводной станции (ГВС) [21].

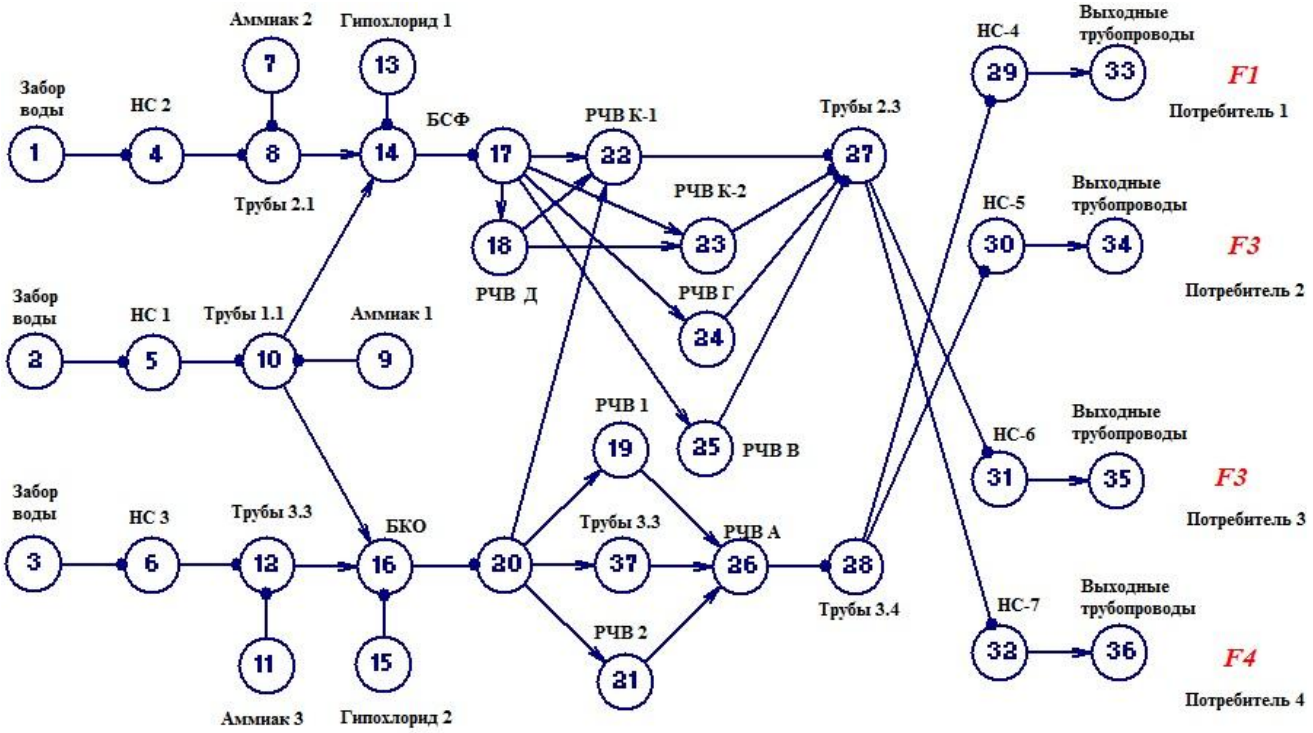


Рисунок 4.6 – СФЦ работоспособности типовой ГВС

В таблице 4.3 приведены обозначения и описания элементов и подсистем моделируемой ГВС.

Таблица 4.3 – Состав и предназначение элементов ГВС

Номера вершин	**Логические переменные**	**Обозначение на СФЦ**	**Наименование элемента**
1, 2, 3	x_1, x_2, x_3	Забор воды	Подсистемы водоподведения №1, №2, №3
4, 5, 6	x_4, x_5, x_6	НС 1, НС 2, НС 3	Подсистемы насосных станций №2, №1 и №3 первого уровня подъема
7, 9, 11	x_7, x_9, x_{11}	Аммиак 2, 1, 3	Элемент подачи аммиака для очистки воды в трубы №2.1, №1.1 и №3.1
8,10,12,17, 20, 27, 28, 37	$x_8, x_{10}, x_{12}, x_{17}, x_{20}, x_{27}, x_{28}, x_{37}$	Трубы 2.1-3.3	Трубы №2.1, №1.1, №3.1, №2.2, №3.2, №2.3, №3.4, №3.3
13, 15	x_{13}, x_{15}	Гипохлорит 1, 2	Элементы подачи гипохлорита №1, №2
14	x_{14}	БСФ	Подсистема блока скорых фильтров
16	x_{16}	БКО	Подсистема блока контактных осветителей
18	x_{18}	РЧВ Д	Элементы резервуара чистой воды (РЧВ) Д, 1, 2, К-1, К-2, Г, В, А.
19, 21	x_{19}, x_{21}	РЧВ 1, РЧВ 2	
22, 23	x_{22}, x_{23}	РЧВ К-1, РЧВ К-2	
24, 25, 26	x_{24}, x_{25}, x_{26}	РЧВ Г, РЧВ В, РЧВ А	
29, 30, 31, 32	$x_{29}, x_{30}, x_{31}, x_{32}$	НС 4, 5, 6, 7	Подсистемы насосной станции (НС) №4, №5, №6, №7 второго подъема
33, 34, 35, 36	$x_{33}, x_{34}, x_{35}, x_{36}$	Выходные трубопроводы	Выходные трубопроводы к Потребителям 1, 2, 3, 4 (***F1, F2, F3, F4***)

Приведенная на рисунке 4.6 СФЦ использовалась в научно-исследовательской работе [21] для обоснования возможности применения ОЛВМ, технологии АСМ и программного комплекса "АРБИТР" [18] при выполнении вероятностного моделирования и расчета показателей надежности и комплексной безопасности систем водоснабжения и водоотведения на стадии их проектирования. Ниже представлены два варианта решения – с помощью "ПК АСМ ЛВДМ" и программного комплекса "АРБИТР"

Функционально заданная СФЦ представляет состав и структуру элементов и подсистем ГВС, которые обеспечивают подачу воды требуемого объема и качества от трех подсистем водоподведения (водозаборы 1, 2 и 3) к четырем потребителям (***F1 – F4***).

По свойству устойчивости, СФЦ на рисунке 4.6 представляет все событийно-логические условия выполнения системных функций каждым элементом и подсистемой, которые входят в ГВС.

С помощью функциональных вершин $\boldsymbol{i}$ = 1-37 в СФЦ представляются состояния $\boldsymbol{x_i}$ работоспособности тех элементов и подсистем, которые имеют не аб-

солютную безотказность или устойчивость и существенно влияют на реализацию функций ГВС. Значения вероятностных параметров устойчивости (безотказности) элементов ГВС записаны на рисунке 4.6 около соответствующих функциональных вершин СФЦ.

На рисунке 4.7 изображено рабочее окно интерфейса пользователя ПК "АРБИТР", а на рисунке 4.8 – рабочее окно интерфейса "ПК АСМ ЛВДМ" с результатами моделирования и расчета вероятности безотказного обеспечения ГВС водой хотя бы одного из четырех потребителей.

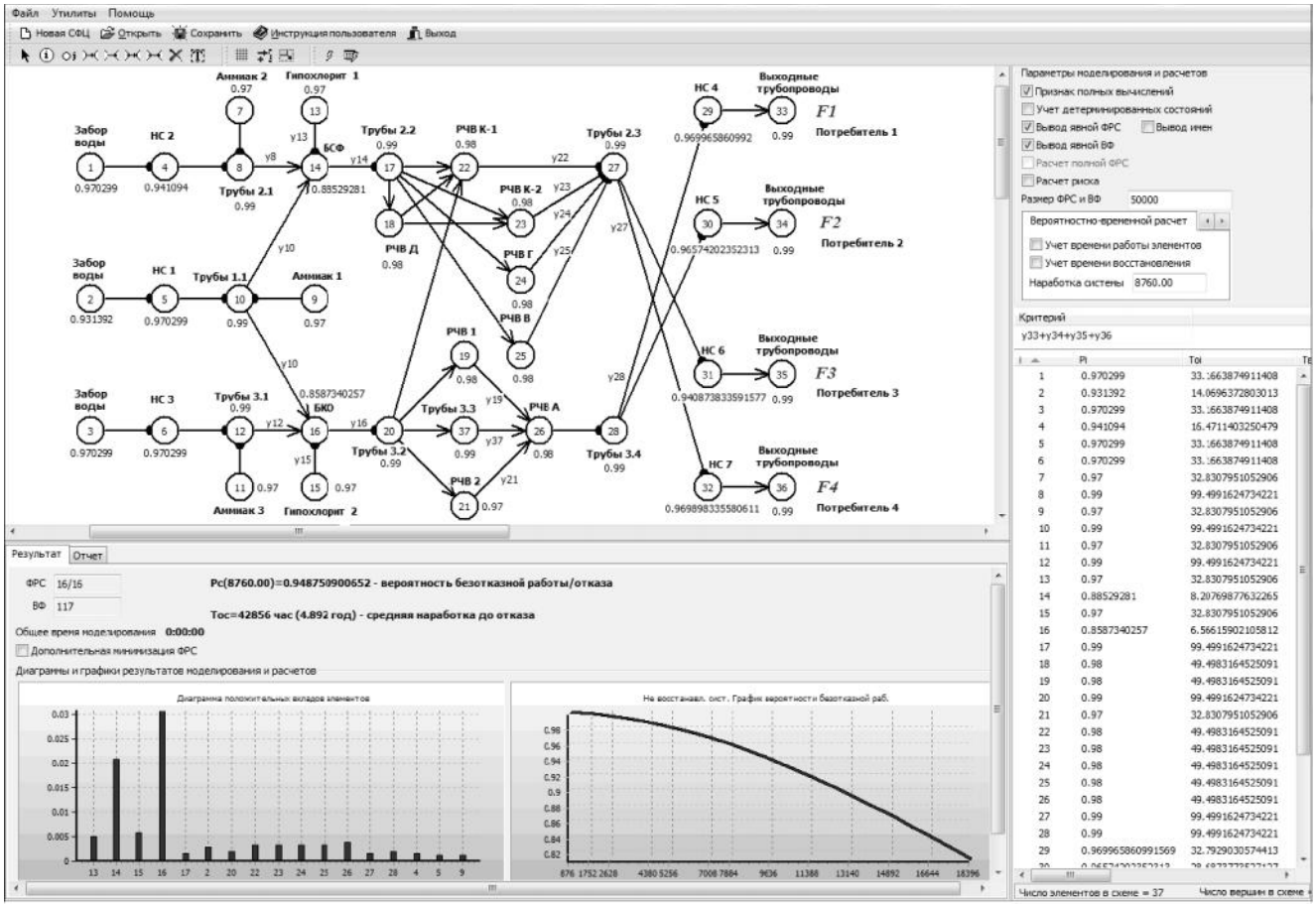


Рисунок 4.7 – Результаты проектного моделирования устойчивости (безотказности) ГВС с помощью ПК "АРБИТР"

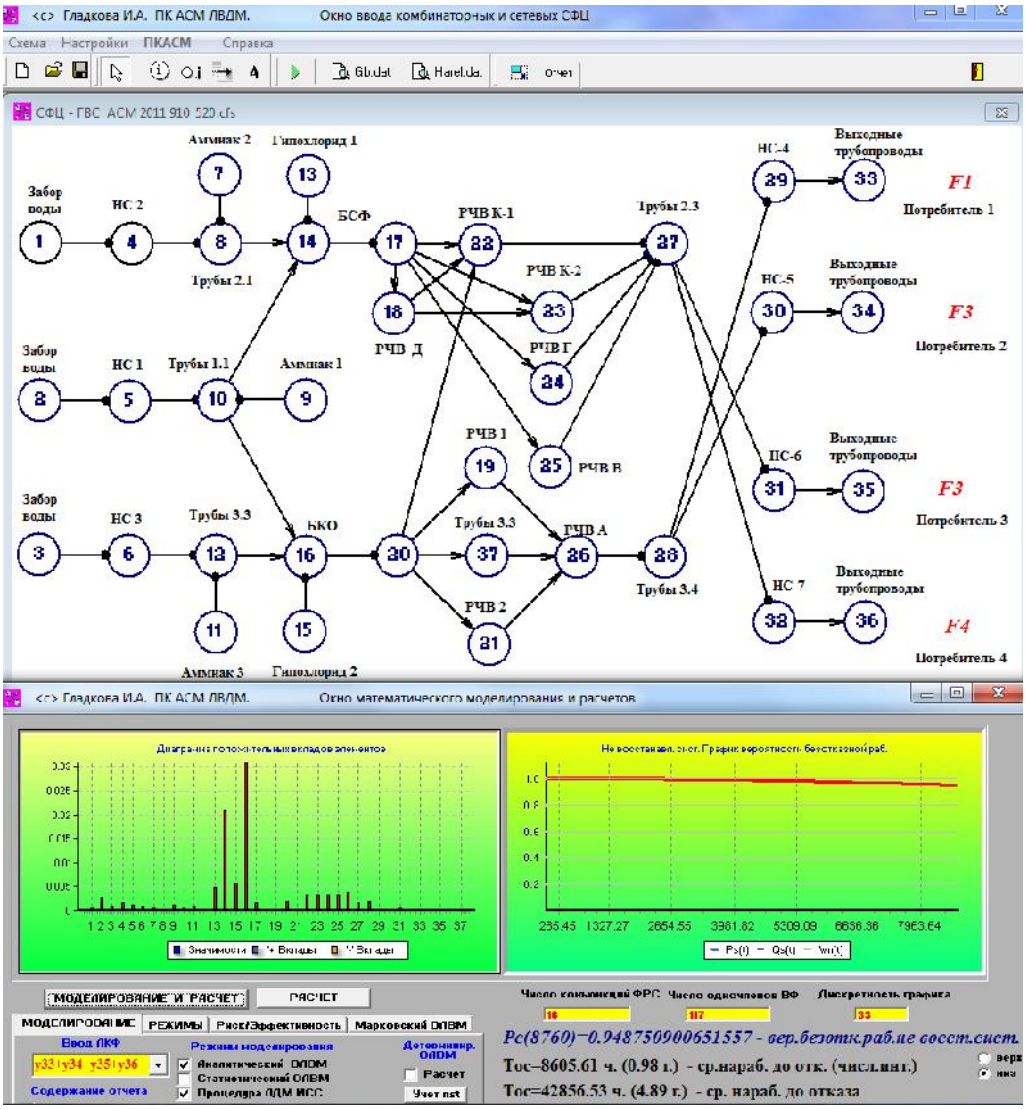


Рисунок 4.8 – Результаты проектного моделирования устойчивости (безотказности) ГВС с помощью "ПК АСМ ЛВДМ"

При заданных параметрах безотказности элементов вероятность безотказной реализации указанного режима работы ГВС составила

$$Pc(8760.00) = 0.948750900652 \qquad (3.52)$$

В первом варианте задачи моделирования и расчета показателей устойчивости ГВС требуется определить достоверные последствия отказа (аварии) одного элемента 13 ($\boldsymbol{nst} = \{13\}$, отказ элемента подачи гипохлорита №1). На рисунке 4.9 приведены результаты решения этого примера детерминированного моделирования последствий отказа (аварии) элемента 13 ГВС, полученные с помощью ПК "АРБИТР", а на рисунке 4.10 – с помощью "ПК АСМ ЛВДМ".

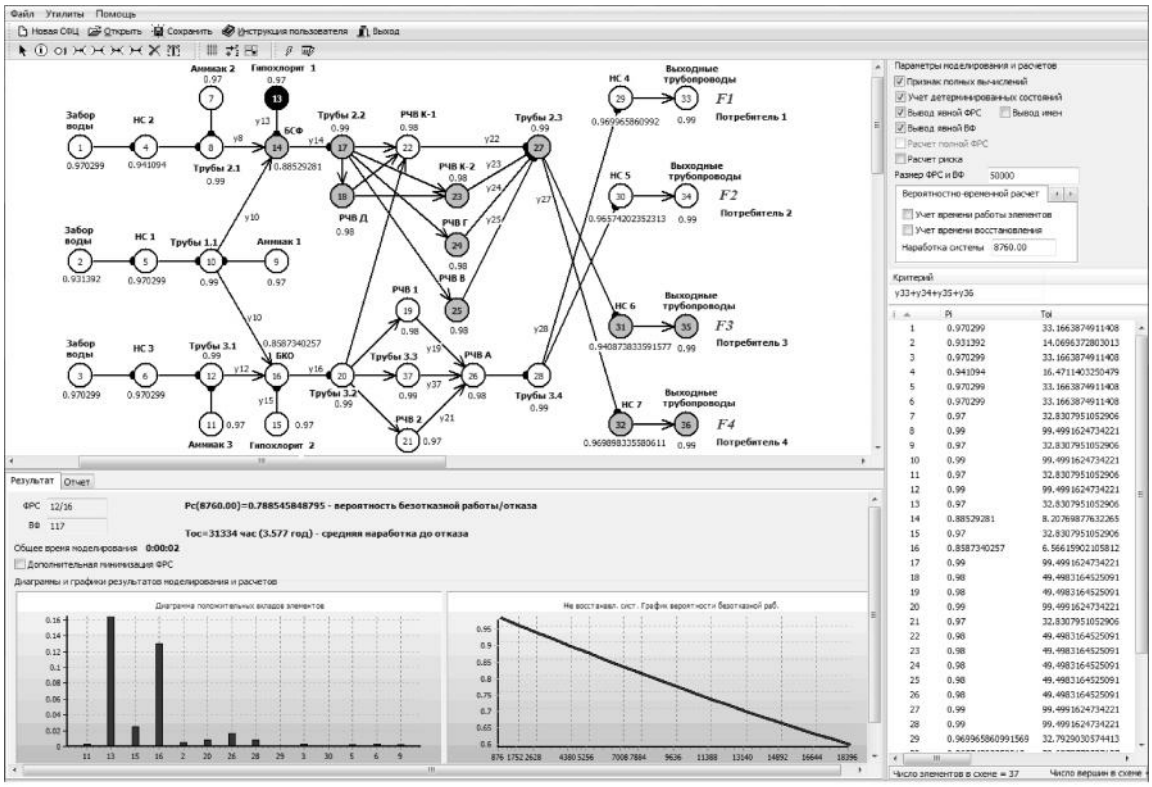


Рисунок 4.9 – Результаты СЛМ ИСС ГВС с помощью ПК "АРБИТР"

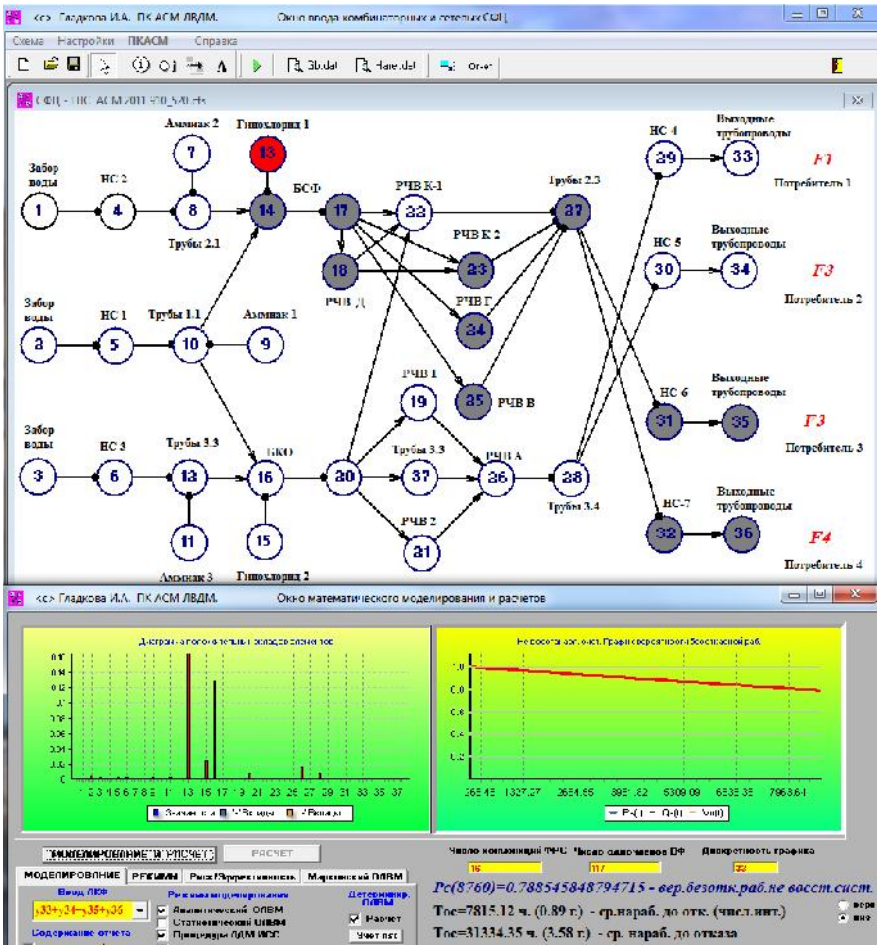


Рисунок 4.10 – Результаты СЛМ ИСС с помощью "ПК АСМ ЛВДМ"

Темный цвет вершины 13 обозначает возникновение достоверного отказа элемента подачи гипохлорита №1. Результаты детерминированного моделирования последствий этого отказа на рисунках 4.9 и 4.10 представлены вершинами серого и белого цветов. Вершины серого цвета (14, 17, 18, 23-25, 27, 31, 32, 35 и 36) представляют те элементы и подсистемы ГВС, выходные функции которых достоверно не реализуются вследствие отказа элемента 13 (функционально отказали, поражены).

Дополнительно, методика СЛМ ИСС, позволяет построить модель и количественно оценить изменение устойчивости системы вследствие возникновения аварийной ситуации. Как видно из рисунков 4.9 и 4.10, вероятность безотказной работы ГВС после аварии элемента 13 составила

$$Pc(8760.00) = 0.788545848795,$$

что существенно ниже значения 0.948750900652 этого показателя до события возникновения аварии (см. (3.52)).

Важную дополнительную информацию для анализа последствий возникновения аварийной ситуации может дать диаграмма отрицательных вкладов элементов [7, 9]. Для рассматриваемого примера оценки последствий для ГВС ситуации возникновения отказа (поражения) элемента 13 диаграмма отрицательных вкладов элементов имеет следующий вид.

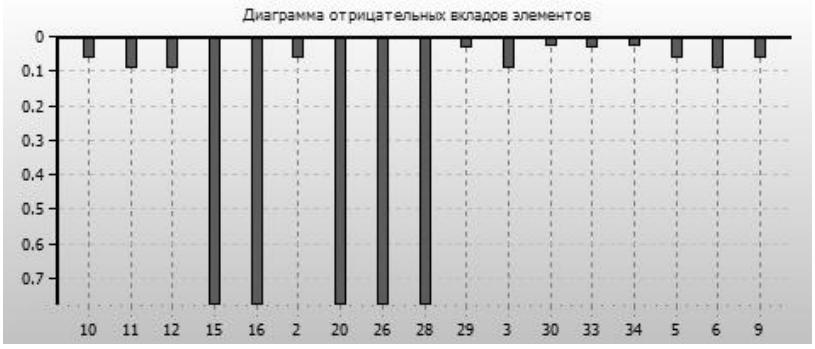


Рисунок 4.11 – Диаграмма отрицательных вкладов элементов ГВС после отказа (поражения) элемента 13 (подачи гипохлорита №1)

Анализ этой диаграммы показывает, что после возникновения аварийной ситуации $\boldsymbol{nst = \{13\}}$ наиболее опасными являются отказы (поражения, отключения) элементов 15, 16, 20, 26 или 28. Отказ (поражение, отключение) даже одного из

них достоверно приведет к прекращению обеспечения водой всех четырех потребителей (***F1***, ***F2***, ***F3*** и ***F4***), т.е. полной аварии ГВС.

Результаты, полученные этими двумя программными комплексами, полностью совпали.

4.5.3 Использование "ПК АСМ ЛВДМ" для совместного вероятностного и детерминированного анализа систем

В качестве примера рассматривается задача построения сетевого плана процесса технологической подготовки производства для изготовления станка VMG-50 и определения его детерминированных показателей и вероятности выполнения всего комплекса работ. Процесс технологической подготовки производства (ТПП) состоит из 14 работ, выполняемых друг за другом. Некоторые из них не зависят друг от друга и могут выполняться параллельно. В таблице 4.4 представлены все работы и события, связанные с ними.

На основе представленных исходных данных была построена сетевая СФЦ плана ТПП (рисунок 4.12)

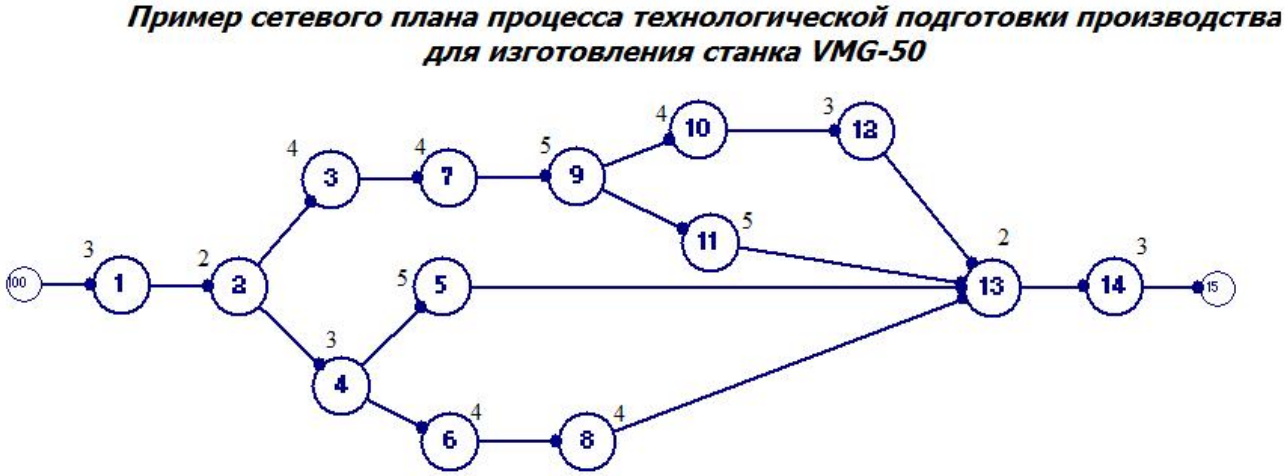


Рисунок 4.12 – СФЦ сетевого графика работ процесса ТПП

Таблица 4.4 – Исходные данные для построения сетевого графика

№ события	№ работы	Название события	Название работы	Длительность, дней	Непосредственно предшествующие работы
1	1	План ТПП разработан	Заключение о возможности изготовления деталей	3	–
2	2	Заключение получено	Согласование чертежей на технологичность	2	1
3	3	Согласование получено	Определение перечня деталей и комплектующих, получаемых у поставщиков	4	2
	4		Инвентаризация имеющейся документации согласно полной спецификации	3	
4	5	Инвентаризация закончена	Материальное нормирование	5	4
	6		Создание и выдача задания конструктору на проектирование оснастки	4	
5	7	Инвентаризация и определение перечня деталей закончены	Разработка маршрута изготовления деталей	4	3, 4
6	8	Задание на оснастку составлено и выдано	Разработка оснастки с проектированием необходимых приспособлений	4	6
7	9	Маршрут изготовления деталей разработан	Разработка технологических процессов	5	7
8	10	Разработка технологических процессов завершена	Разработка перечня используемого оборудования	4	9
	11		Разработка перечня используемого инструмента	5	
9	12	Перечень используемого оборудования разработан	Трудовое нормирование	3	10
10	13	Завершены: - материальное нормирование; - разработка оснастки с приспособлениями; - перечень используемого оборудования и инструментов	Внедрение технологической документации	2	5, 8, 11, 12
11	14	Технологическая документация внедрена	Корректировка технологической документации	3	13
12	15	Корректировка завершена			14

В результате автоматизированного расчета с помощью "ПК АСМ ЛВДМ" получены следующие результаты:

1 Построен сетевой план в виде сетевой ФАЛ

$$Yc\ Z\ y_{15}\ Z \left| \begin{array}{l} x_1 \grave{\imath} x_2 \grave{\imath} x_3 \grave{\imath} x_7 \grave{\imath} x_9 \grave{\imath} x_{10} \grave{\imath} x_{12} \grave{\imath} x_{13} \grave{\imath} x_{14} \\ x_1 \grave{\imath} x_2 \grave{\imath} x_3 \grave{\imath} x_7 \grave{\imath} x_9 \grave{\imath} x_{11} \grave{\imath} x_{13} \grave{\imath} x_{14} \\ x_1 \grave{\imath} x_2 \grave{\imath} x_4 \grave{\imath} x_6 \grave{\imath} x_8 \grave{\imath} x_{13} \grave{\imath} x_{14} \\ x_1 \grave{\imath} x_2 \grave{\imath} x_4 \grave{\imath} x_5 \grave{\imath} x_{13} \grave{\imath} x_{14} \end{array} \right|$$

2 Вычислены показатели всех путей данного сетевого плана и определен критический путь:

длительности путей СП

T_1 Z 30 дней
T_2 Z 28 дней
T_3 Z 21 день
T_4 Z 18 дней
$T_{КП}$ Z T_1 Z 30 дней

Резервы времени путей СП

R_1 Z 0 дней
R_2 Z 2 дня
R_3 Z 9 дней
R_4 Z 12 дней

3 Рассчитаны показатели всех ***i***=14 работ сетевого плана

i	t_i	$t_{РН}$	$t_{РО}$	$t_{ПН}$	$t_{ПО}$	$R_П$	$R_С$
1	3	0	3	0	3	0	0
2	2	3	5	3	5	0	0
3	4	5	9	5	9	0	0
4	3	5	8	14	20	9	0
5	5	8	13	20	25	12	12
6	4	8	12	17	21	9	0
7	4	9	13	9	13	0	0
8	4	12	16	21	25	9	9
9	5	13	18	13	18	0	0
10	4	18	22	18	22	0	0
11	5	18	23	20	25	2	2
12	3	22	25	22	25	0	0
13	2	25	27	25	27	0	0
14	3	27	30	27	30	0	0

4 Определена вероятность выполнения сетевого плана ТПП

Pc Z 0.760935885881

На рисунке 4.13 представлено окно интерфейса "ПК АСМ ЛВДМ" с результатами моделирования и расчета показателей сетевого плана ТПП.

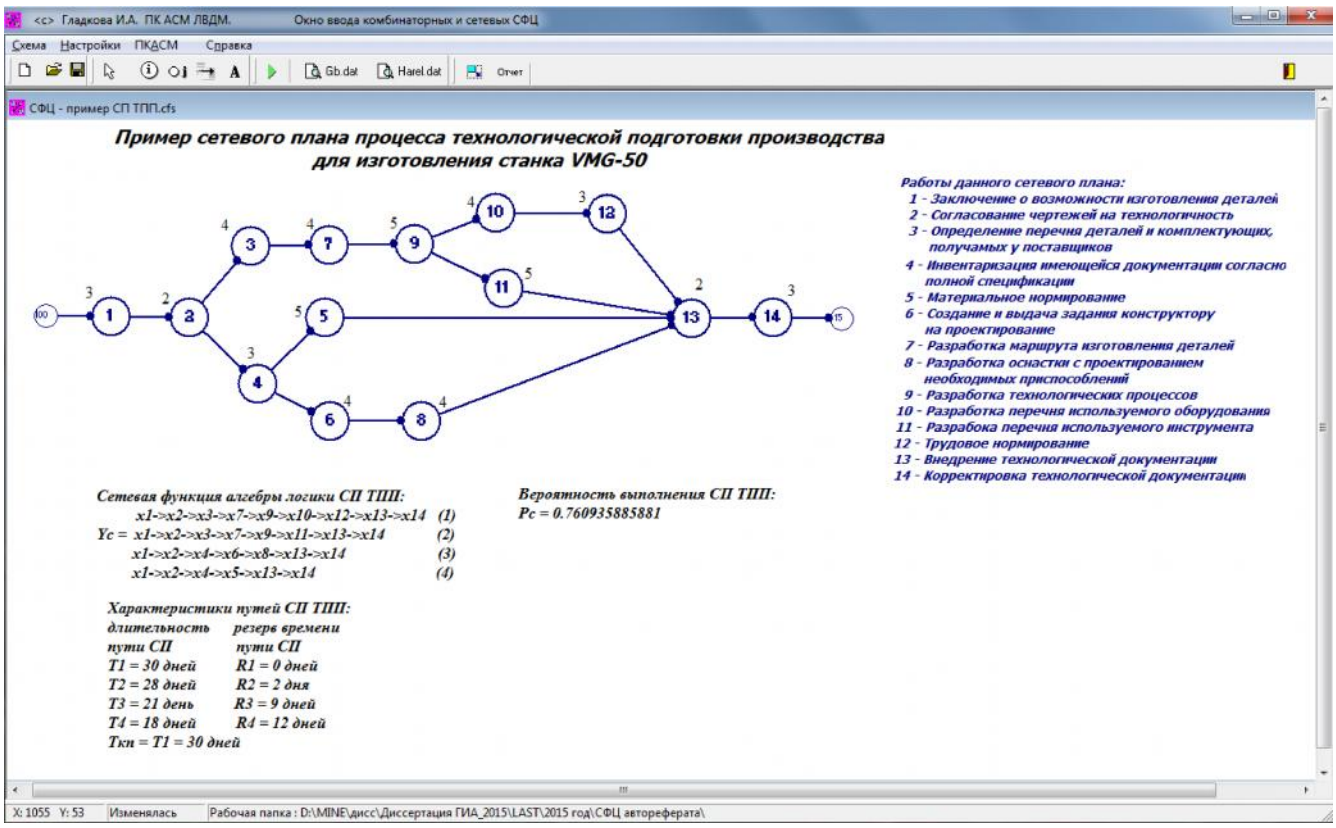


Рисунок 4.13 – Окно интерфейса "ПК АСМ ЛВДМ" с результатами автоматизированного моделирования и расчета показателей СП ТПП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены результаты постановки и решения научных и практических задач, связанных с разработкой проблемы создания комплекса методов, методик, процедур, а также математического и алгоритмического обеспечения автоматизированного моделирования и расчета показателей результативности и устойчивости функционирования сложных систем с сетевой структурой большой размерности (до 400 элементов), которые включают в себя следующие основные положения:

1 Определены основные особенности рассматриваемого класса сложных организационных и технических систем с сетевой структурой как объектов автоматизированного моделирования и оценки результативности и устойчивости их функционирования на стадиях исследования, проектирования и эксплуатации. Основные выделенные особенности заключаются в большой структурной сложности (наличии параллельных, последовательных и мостиковых соединений), высокой размерности (до нескольких сотен элементов) и необходимости построения математических моделей, в которых учитываются достоверные изменения исходных состояний и детерминированные последовательности реализации функций элементами.

2 Обоснован выбор общего логико-вероятностного метода и технологии автоматизированного структурно-логического моделирования в качестве исходной базы для разработки комплекса новых метода, методик, алгоритмов и компьютерных программ автоматизированного построения расчетных математических моделей и оценки показателей результативности и устойчивости функционирования сетевых организационных и технических систем различного назначения. Разработка новых метода, методик и программно-алгоритмических средств осуществлялась путем расширения функциональных возможностей общего логико-вероятностного метода моделирования и расчета показателей устойчивости сложных систем.

3 Определены новые направления разработки теории, технологии и

программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования, из которых главными по теме диссертации являются:

− разработка новых метода и методик структурно-логического моделирования построения математических моделей учета изменений состояний и детерминированных последовательностей событий;

− разработка специальных методик моделирования и расчета детерминированных показателей результативности функционирования сложных систем с сетевой структурой двух видов – сетевых планов работ и потоковых систем.

4 Разработана новая специальная методика структурно-логического моделирования последствий изменений текущих состояний системы вследствие достоверных отказов, поражений или отключений различных групп ее элементов в процессе функционирования.

5 Разработан сетевой графоаналитический метод структурно-логического моделирования последовательностей событий выполнения собственных функций элементами в процессе функционирования сложных систем, который включает:

− правила представления последовательностей элементарных событий сложных систем с сетевой структурой в схемах функциональной целостности (системах логических уравнений);

− дополненные положения алгебры логики, обеспечивающие учет и аналитическое представление последовательностей событий в логических моделях функционирования сложных систем;

− новые положения сетевого графоаналитического метода решения систем логических уравнений с учетом последовательностей элементарных событий и представления их дополненными средствами алгебры логики.

6 Разработаны основные положения методики структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности функционирования сетевых планов выполнения работ.

7 Разработаны основные положения методики структурно-логического моделирования и расчета показателей результативности функционирования потоковых сетей.

8 Разработана общая структура и сформулированы требования к основным подсистемам специализированного программно-алгоритмического комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами.

9 Разработаны методические рекомендации по применению технологии и программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования надежности и безопасности структурно-сложных технических систем в организациях и на предприятиях промышленности.

10 Новизна результатов подтверждается отсутствием аналогов решения задачи создания комплекса методов, методик, алгоритмов и программ автоматизированного моделирования и расчета показателей результативности и устойчивости функционирования сложных систем с сетевой структурой.

11 Подтверждены адекватность модельного автоматизированного представления сетевых организационных и технических систем и корректность расчетных методик оценки показателей результативности и устойчивости их функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1 Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М. : Радио и связь, 1981. 261 с.

2 О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон Рос. Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 02 июля 2013 г.) : принят Гос. Думой 20 июня 1997 г. // СЗ РФ от 28 июля 1997 г. № 30. ст. 3588 ; Рос. газ. 1997. 30 июля.

3 Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов : РД 03-418-01. Взамен РД 08-120-96. введ. 01.09.01. М., 2001. Вып. 10. 60 с.

4 ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения : Изд. июль 2002. Введ. 30.06.90. М. : Стандартинформ, 2002. 24 с.

5 Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем : монография. СПб. : Изд-во с.-петерб. ун-та, 2007. 278 с.

6 Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем : монография. Л. : Судостроение, 1967. 364 с.

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

8 Можаев А.С. Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем : сб. Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем / под ред. проф. И.А. Рябинина. Препринт 101. СПб. : ИПМАШ РАН, 1994. Ч.I. Вып.1. С. 23–53.

9 Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография / В.И. Поленин, И.А. Рябинин, С.К. Свирин, И.А. Гладкова / под ред. проф. А.С. Можаева. СПб. : НИКА, 2011. 410 с.

10 ГОСТ Р 51901.12–2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов : Изд. июнь 2008. Введ. 01.09.08. М. : Стандартинформ, 2008. 35 с.

11 ГОСТ Р МЭК 61508-4–2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 4. Термины и определения : Изд. июнь 2008. Введ. 01.06.08. М. : Стандартинформ, 2008. 21 с.

12 О безопасности гидротехнических сооружений : федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ (ред. от 28 декабря 2013 г.) : принят Гос. Думой 23 июня 1997 г. // СЗ РФ от 28 июля 1997 г. № 30. ст. 3589 ; Рос. газ. 1997. 29 июля.

13 ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 19791–2008. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Оценка безопасности автоматизированных систем. Изд. май 2010. Введ. 01.10.09. М. : Стандартинформ, 2010. 126 с.

14 ГОСТ Р 51901.1-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. Изд. октябрь 2002. Введ. 31.08.03. М.: Госстандарт России, 2002. 28 с.

15 Mozhaev A.S. Theory and practice of automated structural-logical simulation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). St.Petersburg : SPIIRAS, 1997. Tom 3. P. 1109–1118.

16 ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. Изд. май 2012. Взамен ГОСТ Р 51901.13–2005 (МЭК 61025:1990) ; введ. 31.08.10. М. : Стандартинформ, 2012. 28 с.

17 ГОСТ Р 51901.5–2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности. Изд. дек. 2005. Изм. от 01.08.06 ; введ. 01.02.06. М. : Стандартинформ, 2005. 49 с.

18 Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем "АРБИТР" (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0 : Свидетельство об официальной регистрации № 2003611101 / Можаев А.С. ; разработчик и правообладатель ОАО "СПИК "СЗМА", Санкт-Петербург. Аттестационный паспорт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) РФ № 222 ; заявл. 21.11.05 ; опубл. 21.02.07.

19 Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001) : Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099 ; разработчики и правообладатели Можаев А.С., Гладкова И.А. № 2003610570 ; заявл. 14.03.03 ; опубл. 12.05.03.

20 Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций (ЛОГ&ВФ) : Свидетельство об официальной регистрации № 2003611100 ; разработчики Можаев А.С., Гладкова И.А. ; правообладатель Можаев А.С. № 2003610571 ; заявл. 14.03.03 ; опубл. 12.05.03.

21 Исследование возможности применения ОЛВМ, технологии автоматизированного структурно-логического моделирования и программного комплекса АРБИТР (базовая версия 1.0) для анализа комплексной безопасности (надежности) систем водоснабжения и водоотведения (шифр "НКБР-Водоканал") : отчет о научно-исследовательской работе / А.А. Гусаров [и др.]. СПб. : ЗАО "ТЕЛРОС", ОАО "СПИК СЗМА", 2008. 99 с.

22 Можаев А.С. Общий логико-вероятностный метод автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, безопасности и риска сложных систем : монография : многотомное издание "Безопасность России". Анализ риска и проблем безопасности. в 4 ч. М. : МГФ "Знание", 2006. Ч. I: Основы анализа и регулирования безопасности. С. 153–197.

23 Демоверсия Программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем 2001 (ПК "АСМ 2001 Демо") [Электронный ресурс] : приложение CD-диск к монографии [9] / И.А. Гладкова. 1 CD-ROM.

24 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью : ГОСТ Р МЭК 61508-5-2007. Изд. май 2008. Введ. 01.06.08. М.: Стандартинформ, 2008. Ч. 5. 22 с.

25 Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы : ГОСТ Р 51901.14–2007 (МЭК 661078:2006). Изд. сент. 2008. Взамен ГОСТ Р 51901.14–2005 ; введ. 01.09.08. М. : Стандартинформ, 2008. 23 с.

26 Методические рекомендации по разработке и подготовке к принятию проектов технических регламентов // Утверждены Приказом Минпромэнерго России от 12 апреля 2006 г. N 78. М. : 2006. 83 с.

27 Лопатников Л. И. Экономико-математический словарь: словарь современной экономической науки. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Дело, 2003. 520 с.

28 Сыроежин И.М. Математика сетевых планов. М. : Экономика, 1967. 166 с.

29 Глазман И.М., Новиков В.Г. Основы сетевого планирования и управления. Харьков : Харьковский ун-т, 1966. 96 с.

30 Основные положения по разработке и применению систем сетевого планирования и управления. Межотраслевые инструктивно-методические материалы. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Экономика, 1967. 86 с.

31 Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М. : Энегоатомиздат, 1989. 592 с.

32 Надежность электроэнергетических систем : справочник / под ред. Розанова М.Н. М. : Энегоатомиздат, 2000. 565 с.

33 Гук Ю.Б., Карпов В.В. Теория надежности в электроэнергетике: конспект лекций. СПб. : Гос. технический ун-т, 1999. 82 с.

34 Вопросы надежности систем водоснабжения : сб. тр. / под общей редакцией проф., д.т.н. Абрамова Н.Н. М. : Инженерно-строительный ин-т им. В.В. Куйбышева, 1978. № 170. 10 с.

35 Ильин Ю.А. Расчет надежности подачи воды. М. : Стройиздат, 1987. 320 с.

36 Менеджмент риска. Применение марковских методов : ГОСТ Р 51901.15–2005 (МЭК 61165:1995). Изд. нояб. 2005. Введ. 01.02.06. М. : Стандартинформ, 2005. 15 с.

37 Risk Spectrum PSA Professional 1.20 : Theory Manual. RELCON AB, 1998. 57 p.

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

39 Код "РИСК" для выполнения стандартных вероятностных расчетов. М. : ОЦРК.

40 Бахметьев А.М., Былов И.А., Милакова Ю.В. Верификация и обоснование программы CRISS 4.0 для моделирования и анализа систем безопасности ядерной установки при выполнении вероятностного анализа безопасности : отчет о научно-исследовательской работе. Нижний Новгород : ФГУП ОКБМ им. И.И. Африкантова, 2005. Ч. 1: заключительная редакция. 88 с.

41 Relex – программа анализа надежности, безопасности, рисков / В.С. Викторова [и др.]. Надежность, 2003. №4(7). С. 42–64.

42 Мусаев А.А., Гладкова И.А. Современное состояние и направления развития общего логико-вероятностного метода анализа систем : тр. СПИИРАН, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН. СПб. : Изд-во "Анатолия", 2010. Вып.1(12). С. 75–96.

43 Гладкова И.А. Основные положения детерминированного ОЛВМ анализа безопасности и эффективности систем // Российская акад. ракетных и артиллерийских наук. Тр. XIII Всероссийской научно-практической конференции "Актуальные проблемы защиты и безопасности". Секция Ленинградского обл. регионального отд-ния Общероссийской общественной орг. "Российское науч. о-во анализа риска". СПб. : НПО Специальных материалов, 2010. Т. 4. С. 505–509.

44 Гладкова И.А. Логико-детерминированный метод определения структурных последствий аварийных ситуаций сложных систем // Проблемы анализа риска.СПб. : Финансовый издательский дом "Деловой экспресс", 2012. Т.9, № 2. С. 36–46.

45 Гладкова И.А. Детерминированные разделы общего логико-вероятностного метода : тр. Международной науч. школы "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах" (МА БР – 2010). СПб. : ГУАП, 2010. С. 453–460.

46 Поленин В.И., Гладкова И.А. Общий логико-вероятностный, общий логико-детерминированный и общий логико-физический методы анализа систем : материалы международного конгресса "Цели развития тысячелетия и инновацион-

ные принципы устойчивого развития арктических регионов" // Научно-практическая конф. "Инфокоммуникации в решении задач тысячелетия". Санкт-Петербург, 12-13 ноября 2010 г. СПб. : ПИФ.СОМ, 2010. Т.2. С. 250–261.

47 Райзберг Б.А., Лозовский Л.Ш., Стародубцев Е.Б. Современный экономический словарь. Изд. 2-е, испр. М. : ИНФРА-М, 1998.

48 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") : научно-исследовательская работа // ФГУП СПбАЭП, ОАО "СПИК СЗМА", (Санкт-Петербург), ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова (г. Москва). СПб. : ОАО "СПИК СЗМА", 2005. 282 с.

49 Гладкова И.А., Можаев А.С., Мусаев А.А. Метод логико-детерминированного моделирования сетевых систем // Известия СПбГТИ. СПб. : Изд. СПбГТИ, 2012. Вып.14(40). С. 89–92.

50 Отчет о верификации программного средства "Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем" (ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0, "АРБИТР"): заключительная редакция / А.С. Можаев [и др.]. СПб. : ОАО "СПИК СЗМА", 2007. 1031 с.

51 Можаев А.С. Логико-вероятностный подход к оценке надежности автоматизированных систем управления // Представлена ВМА им. Гречко А.А. Депонирована п/я А-1420 № Д04750, 1982. 24 с.

52 Наливайко П.В. История изучения теории потоков в сетях [Электронный ресурс] : реферат по истории математики // Кафедра мат. логики и теории алгоритмов. М. : МГУ им. Ломоносова, Механико-математический факультет, 2008. 26 с. URL: www.philosophy.ru/library/katr/asp/ref_2.doc (дата обращения: 12.12.2014).

53 Сергеев Н. П., Вашкевич Н.П. Основы вычислительной техники : учеб. пособие для электротехн. спец. вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1988. 311 с.

54 Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем логико-вероятностными и детерминированными методами ("ПК АСМ ЛВДМ") [Электронный ресурс] / И.А. Гладкова ; разработан на основе "ПК АСМ 2001" : Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099 от 12 мая 2003.

55 Поленин В.И., Гладкова И.А. Логико-детерминированные разделы структурно-логического анализа сложных систем : тр. Одиннадцатой Международной науч. школы "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах" (МА БР – 2011). СПб. : ГУАП, 2011. С. 386–394.

56 Поленин В.И., Можаев А.С., Гладкова И.А. Локальный характер оценок эффективности боевых систем в вооруженной борьбе и переход к интегральным оценкам // Морская радиоэлектроника : научно-технический журн. СПб. : Типография Феникс, 2011. Вып.2(36). С. 58–62.

57 Китушин В.Г. Надежность энергетических систем : учеб. пособие для ВУЗов. М. : Высшая школа, 1984. 256 с.

58 Острейковский В.А., Швыряев Ю.В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 350 с.

59 Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов : учеб. пособие. СПб. : Питер, 2005. 479 с.

60 Гладкова И.А. Метод и программные средства логико-детерминированного моделирования потоковых систем и сетевых планов работ : тр. XVI Всероссийской научно-практической конф. РАРАН "Актуальные проблемы защиты и безопасности". СПб. : НПО Специальных материалов, 2013. Т.4. С. 580–592.

61 Гладкова И.А., Струков А.А., Струков А.В. Сценарное логико-вероятностное моделирование опасной ситуации с использованием ПК АРБИТР // Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем : сб. докладов второй международной научно-практической конф. ИКМ МТМТС 2013 (ISBN 978-5-902241-22-5). СПб. : Центр технологии судостроения и судоремонта, 2013. С. 50–54.

62 Поленин В.И., Можаев А.С., Гладкова И.А. Применение теории вероятностей в событийных моделях вооруженного противоборства // Морская радиоэлектроника : научно-технический журнал. СПб. : Типография Феникс, 2013. Вып.4(46). С. 56–61.

63 Поленин В.И., Можаев А.С. Гладкова И.А. Технология решения задачи сетевого планирования и управления процессом коллективной деятельности // Материалы конференции "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2014). – СПб. : ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014, С. 221–227.

64 Гладкова И.А., Нозик А.А., Струков А.В., Струков А.А. Логико-вероятностное моделирование последствий аварий с использованием программного комплекса "АРБИТР" : тр. двенадцатой международной научной школы "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах" (МА БР – 2014). СПб. : ГУАП, 2014, С. 223–228.

65 Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И. Теория систем и оптимального управления. Л. : ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979, 319 с.

66 Можаев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. СПб. : ВИТУ, 2000, 145 с.

67 Резников Б.А. Системный анализ и методы системотехники : учебник. МО, 2006.

68 Поленин В.И., Можаев А.С., Гладкова И.А. Общий логико-вероятностный метод моделирования сложных систем : монография. Германия : Palmarium Academic Publishing, 2015. 688 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1	**Объект** (item) Часть, Элемент	Любая часть, элемент, устройство, подсистема, функциональная единица, аппаратура или система, которую можно рассматривать самостоятельно [10,с. 2].
2	**Система** (systema)	**Система** (от греч. Systema – целое, составленное из частей; соединение), множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определённую целостность, единство. [БСЭ, 1969-1978] Главными признаками системы являются наличие у нее свойств, не присущих элементам (эмерджентность) и принципиальная несводимость свойств системы к простой сумме свойств составляющих её компонентов (неаддитивность).
7	**Результативность**	http://quality.eup.ru/ECONOM/result-process.htm – **Результативность** определяется стандартами ИСО 9000:2000 как степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов. Кроме того, поясняется, что **результативностью** может считаться приведение в исполнение, достижение (степень законченности действия), выполнение, проведение (степень исполнения) команды, обязанности (долга), назначения (цели), обещания. – **Показатели результативности** процесса, как было сказано выше, характеризуют степень достижения цели процесса и запланированных результатов. Показатели эффективности отражают, насколько оптимизированы ресурсы (минимизированы на единицу полезного результата) и устранены потери при достижении необходимого результата. При этом для оценивания эффективности процесса необходимо, чтобы при оценке результативности использовались показатели, характеризующие экономическую результативность (измеряемую в денежном выражении). Поскольку **результативность характеризует степень достижения цели** процесса и запланированных результатов, следовательно, **показатель результативности** заложен в самой цели процесса.
8	**Надежность**	Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки (*Примечание. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.*) [4, с. 2].
9	**Безотказность**	Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. [4, с. 2]
10	**Отказ**	Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [4, с.3]
11	**Критерий отказа**	Признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации [4, с. 3].

13	**Стойкость,** (условная живучесть)	Свойство системы сохранять работоспособность при случайных поражениях ее элементов вследствие воздействия достоверно возникающих поражающих факторов (ударов, взрывов, пожаров и т.п.). Здесь условность живучести определяется достоверностью возникновения поражающих факторов, а надежность (безотказность) элементов считается абсолютной [9, с. 175].
14	**Живучесть** (полная, безусловная) **Живучесть**	Свойство системы сохранять работоспособность при случайных поражениях ее элементов, вследствие воздействия случайного (недостоверного) возникновения поражающих факторов (ударов, взрывов, пожаров и т.п.). При этом надежность (безотказность) элементов системы считается абсолютной [9,с. 175]. Понятие "живучесть" занимает пограничное место между понятиями "надежность" и "безопасность". Под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов. [4, с. 13]
15	**Устойчивость**	Комплексное свойство системы сохранять работоспособность, определяемое различными совместными комбинациями свойств ее структурной надежности (безотказности), стойкости и живучести [9, с.175].
16	**Безопасность** (safety)	– Состояние объекта, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений [2]; – Свойство объекта при изготовлении и эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды [4, с. 13]; – Отсутствие недопустимого риска [11, с. 4].
20	**Авария**	– Разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ [2, с. 6]. – Мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий [3].
21	**Риск** (risk)	– Потенциальная возможность нанесения ущерба организации в результате реализации некоторой угрозы с использованием уязвимостей активов или группы активов организации (*Примечание – Риск определяется в терминах сочетания вероятности события и его последствий.)* [13, с. 2]. – Сочетание вероятности событий и его последствий (*Примечание – термин "риск" обычно используется тогда, когда существует хотя бы возможность негативных последствий*) [14, с. 1]. – Сочетание вероятности причинения ущерба и тяжести этого ущерба (ИСО/МЭК Руководство 51) [11, с. 4], [24, Приложение А].

22	**Риск аварии**	Мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий [3].
23	**Показатели риска аварии**	Основными количественными показателями риска аварии являются: – **технический риск** – вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта [3]. – **ожидаемый ущерб** – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии, за определенное время [3]. – И др. [3].
24	**Оценка риска аварии**	Процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и/или окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания [3, с. 6].
25	**Анализ риска (рисков) аварии** (risk analysis)	– Процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды [3]. – Системный подход к определению величины риска [13, с. 2]. – Систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска (Примечание – анализ риска обеспечивает базу для оценивания риска, мероприятий по снижению риска и принятие риска) [14, с. 1].
26	**Обработка рисков** (risk treatment)	Процесс выбора и реализации мер обеспечения безопасности (security controls) для измерения рисков [13, с. 2].
27	**Оценка рисков** (risk assessment)	– Процесс, включающий в себя идентификацию рисков, анализ рисков и оценивание рисков [13, с. 2]; – Общий процесс анализа риска и оценивания риска [14, с. 2].
28	**Оценка величины риска** (risk estimation)	Процесс присвоения значений вероятности и последствий риска [14, с. 2].
29	**Оценивание риска** (risk evaluation)	Процесс сравнения оцененного риска с данными критериями риска с целью определения значимости риска (примечание – оценивание риска может быть использовано для содействия решениям по принятию или обработке риска) [14, с. 2].
31	**Менеджмент риска** (risk management)	– Весь процесс идентификации, контроля и управления или минимизации подозрительных (неопределенных) событий, которые могут оказать негативное воздействие на ресурсы системы (менеджмент рисков обычно включает в себя анализ рисков, обработку рисков, принятие рисков, распространение информации о рисках /обмен или предоставление в совместное пользование информации о рисках между лицом, принимающим решение, и другими заинтересованными лицами). [13, с. 2]; – Скоординированные действия по руководству и управлению организацией в отношении рисков (обычно менеджмент риска включает оценку рисков, обработку рисков, принятие рисков и коммуникацию рисков) [14, с. 2].

34	**Блок-схема (структурная схема) безотказности** (Reliability block diagram (RBD))	– Графическое представление изделия в виде блоков, показывающее, как неисправности составных частей и их комбинации влияют на состояние изделия [4, с. 16]. – RBD (структурная схема надежности) представляет собой графическое изображение работоспособного состояния системы. RBD показывает логическую связь функционирующих компонентов, необходимых для успешной работы системы (далее – успех системы) [25, с.IV]
35	**Метод анализа структурной схемы надежности** (RBD)	Является методом анализа надежности системы. RBD является графическим изображением представления логической схемы через подсистемы и/или компоненты и позволяет изобразить пути успеха работоспособности в виде логических связей подсистем/компонентов [17, с. 17].
36	**Дерево неисправностей** (FTA)	– Организованное графическое представление условий или других факторов, вызывающих нежелательное событие, называемое вершиной событий [16, с. 1]. – Систематизированное графическое представление условий и факторов, вызывающих или способствующих появлению ожидаемого итога – завершающего события. [28, с. 4]
37	**Анализ дерева неисправностей, дерево отказов** (FTA)	– Совокупность приемов идентификации опасности и анализа частот нежелательного события, с помощью которых определяются все пути его реализации. Используется графическое изображение [14, с. 11]. – Является нисходящим методом анализа надежности продукции. Он предназначен для идентификации и анализа условий и факторов, которые вызывают или способствуют появлению нежелательного результата и влияют на эффективность, безопасность, экономичность и другие характеристики системы [17, с. 13].
38	**Дерево событий** (Event Tree)	http://www.bestreferat.ru/referat-111856.html Деревья событий (Event Tree) являются графическими моделями, которые упорядочивают и отображают события протекания аварии (выполнение функций безопасности или работу систем) согласно требованиям по ослаблению исходных событий. Они показывают, как среагируют системы АС на рассматриваемое исходное событие, будут ли выполнены при этом функции безопасности, условия безопасной эксплуатации и что произойдет в итоге, как отразится исходное событие на ядерно-опасном объекте. Каждое дерево событий включает диаграмму состояний (граф) и таблицу, поставленные в однозначное соответствие друг другу. Диаграмма состояний (граф) представляет собой систему горизонтальных и вертикальных линий, развивающуюся слева направо вдоль последовательно составленных ячеек таблицы (рисунки 1 – 2). В левой крайней ячейке таблицы указывается исходное событие или его условное обозначение, в последующих – промежуточные события или их условные обозначения. Разветвление горизонтальной линии в пределах какой-либо ячейки таблицы означает либо осуществление (верхняя ветвь), либо неосуществление (нижняя ветвь) события, указанного в ячейке. В правой части диаграммы у соответствующих ветвей указываются возможные конечные состояния (endstate).

39	**Анализ дерева событий** (ETA) (Event Tree Analysis)	– Совокупность приемов идентификации опасности и анализа частот, в которых используется индуктивный подход с целью перевода различных инициирующих событий в возможные исходы [14, с. 11]. – Распространяется на ряд возможных последствий реализации события или отказа системы. Эффективным может быть соединение дерева событий с деревом неисправностей. Корень дерева событий может быть вершиной дерева неисправностей. Эта комбинация иногда называется анализом причины и следствий, в котором FTA используют для анализа причин, а ETA – для анализа последствий реализации события. Чтобы оценить серьезность последствий, которые следуют за реализацией события, необходимо идентифицировать, исследовать и определить вероятность всех возможных последствий [17, с. 16].
40	**Сетевой график** (activity network)	– Сетевой график – используемая в сетевом планировании и управлении схема, отображающая технологическую связь и последовательность разных работ в процессе достижения цели. Главные элементы сетевого графика: "работы" (операции) и "события" – точки, которыми завершаются одни работы (кроме "начального события") и начинаются другие (кроме "конечного события"). [26, БЭС] – http://www.vseslova.ru/index.php?dictionary=bes&word=setevoy_grafik – СЕТЕВОЙ ГРАФИК [activity network] – *граф* типа *сеть*, в котором фиксируется комплекс *работ* (*операций*) и *событий*, отражая их технологическую последовательность и связь в процессе достижения *цели*; основной инструмент *систем сетевого планирования и управления*. [27, ЭМС] http://slovari.yandex.ru/сетевой%20график/Лопатников/Сетевой%20график/
41	**Сетевое планирование и управление** ([network system of planning and control])	*Система*, применяемая в строительстве, в управлении крупными научно-техническими разработками и другими комплексами работ; основана на использовании ЭВМ и *сетевых графиков*. [27, ЭМС] http://slovari.yandex.ru/~%D0%BA%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B8/%D0%9B%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2/%D0%A1%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%B5%20%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%B8%20%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5/
42	**ПЕРТ** (PERT) (*Program (Project) Evaluation and Review Technique*)	http://slovari.yandex.ru/~книги/Лопатников/ПЕРТ/ http://ru.wikipedia.org/wiki/PERT Метод оценки и пересмотра *программ*, одна из разновидностей *систем сетевого планирования и управления*, основанных на использовании понятия *критического пути*. В отличие от других аналогичных методов применяется для организации наиболее сложных систем, где нет основы для получения точных оценок времени, необходимого для выполнения каждой из *работ*, и лишь оцениваются их *вероятности*. [27, ЭМС]

43	**ГЕРТ** (GERT) (*Graphical Evaluation and Review Technique*))	http://ru.wikipedia.org/wiki/GERT Материал из Википедии — свободной энциклопедии Перейти к: навигация, поиск **Метод графической оценки и анализа** (**GERT**, англ. *Graphical Evaluation and Review Technique*) — альтернативный вероятностный метод сетевого планирования, применяется в случаях организации работ, когда *последующие задачи* могут начинаться после завершения только ***некоторого*** числа из *предшествующих задач*, причём не все задачи, представленные на сетевой модели, должны быть выполнены для завершения проекта. Разработан в США в 1966 году. Основу применения метода GERT составляет использование альтернативных сетей, называемых GERT-сетями. Они позволяют более адекватно задавать сложные процессы строительного производства в тех случаях, когда затруднительно или невозможно (по объективным причинам) однозначно определить, какие именно работы и в какой последовательности должны быть выполнены для достижения цели проекта (то есть существует многовариантность реализации проекта). Расчёт GERT-сетей, моделирующих реальные процессы, чрезвычайно сложен, однако программное обеспечение для вычисления сетевых моделей такого типа в настоящее время не распространено.
44	**Логико-Вероятностный Метод** (ЛВМ)	Метод расчета надежности судовых электроэнергетических систем, при котором структура СЭС описывается средствами математической логики, а количественная оценка ее надежности производится с помощью теории вероятностей. [5, с. 26], [6, с. 249].
45	**Общий Логико-Вероятностный Метод** (ОЛВМ)	Отличается от классических монотонных ЛВМ следующими основными положениями [7, 8, 9 раздел II]: • применением на структурном и аналитическом уровнях моделирования функционально полного набора логических операций ‘И’, ‘ИЛИ’, ‘НЕ’, т.е. полной реализацией возможностей алгебры логики по построению как всех видов монотонных, так и нового класса немонотонных моделей функционирования сложных системных объектов и процессов; • использованием для структурного описания систем универсального аппарата схем функциональной целостности; • использованием не только гипотезы о независимости бинарных событий, но и учетом зависимостей событий, которые представляются с помощью аппарата групп несовместных событий.
46	**Схема Функциональной Целостности** (СФЦ)	Графический аппарат структурно-логического представления исследуемых свойств сложных системных объектов различного назначения. Является основой Общего Логико-Вероятностного Метода, теории и технологии Автоматизированного Структурно-логического Моделирования. [5, 6, 9 раздел II].
47	**Автоматизированное Структурно-логическое Моделирование** (АСМ)	Специальное научное направление и технология, в основе которых лежат теория автоматизированного структурно-логического моделирования, общий логико-вероятностный метод системного анализа, аппарат схем функциональной целостности, алгоритмы, программы, программные комплексы и методики построения с помощью ЭВМ математических моделей и расчета показателей устойчивости (надежности, живучести, безопасности) эффективности и риска функционирования системных объектов большой размерности и высокой структурной сложности [7-9, 15, 18-22].

48	**Сеть**	Представляет собой специальный вид графа, состоящего из вершин и ребер, соединяющих пары вершин. Каждое ребро имеет пропускную способность, которая ограничивает поток. В сети выделены две терминальные вершины – источник и сток [52, с. 3]. http://www.philosophy.ru/library/katr/asp/ref_2.doc
49	**Поток в сети**	Неотрицательная вещественная функция, определенная на ребрах сети, обладающая дополнительными условиями консервативности (для каждой нетерминальной вершины сумма потока по входящим ребрам равна сумме потока по исходящим) и подчиненности пропускным способностей (поток по ребру не превышает его пропускной способности) [52, с. 3]. http://www.philosophy.ru/library/katr/asp/ref_2.doc
50	**Сетевая система**	Системный объект, условия реализации функций в котором представляются монотонными последовательно–параллельными и циклическими структурными схемами, с помощью которых определены детерминированные направления потоков событий, работ, мощности, вещества и т.п. Характерными примерами систем данного класса являются сетевые планы работ [28-30], электрические сети [31-33], системы водоснабжения и водоотведения [12, 21, 34, 35].

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

АВТОРСКИЙ ЭКЗЕМПЛЯР

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ (РОСПАТЕНТ)

СВИДЕТЕЛЬСТВО

Об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2003611100

На основании Закона Российской Федерации "О правовой охране программ для электронных вычислительных машин и баз данных", введенного в действие 20 октября 1992 года, Российским агентством по патентам и товарным знакам выдано настоящее свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ

"Библиотека программных модулей автоматического построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем и многочленов вероятностных функций" (ЛОГ & ВФ)

Правообладатель(ли):

Можаев Александр Сергеевич (RU)

Автор(ы):

Можаев Александр Сергеевич,
Гладкова Ирина Александровна (RU)

Страна: Российская Федерация

по заявке № 2003610571, дата поступления: 14 марта 2003 г.

Зарегистрировано в
Реестре программ для ЭВМ

г. Москва, ***12 мая 2003 г.***

Генеральный директор

А.Д. Корчагин

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ (РОСПАТЕНТ)

СВИДЕТЕЛЬСТВО

Об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2003611099

На основании Закона Российской Федерации "О правовой охране программ для электронных вычислительных машин и баз данных", введенного в действие 20 октября 1992 года, Российским агентством по патентам и товарным знакам выдано настоящее свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ

"Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем 2001" (ПК АСМ 2001)

Правообладатель(ли):

Можаев Александр Сергеевич,
Гладкова Ирина Александровна (RU)

Автор(ы):

Можаев Александр Сергеевич,
Гладкова Ирина Александровна (RU)

Страна: Российская Федерация

по заявке № 2003610570, дата поступления: 14 марта 2003 г.

Зарегистрировано в
Реестре программ для ЭВМ

г. Москва, ***12 мая 2003 г.***

Генеральный директор

А.Д. Корчагин