

# АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА

*Александр Сергеевич Можжаев*

(Специализированная инженеринговая компания "СЕВЗАПМОНТПЖАВТОМАТИКА")

*Юрий Федорович Демидов*

(Военно-Морская Академия имени Н.Г.Кузнецова)

## Аннотация

В сообщении представлен аппарат схем функциональной целостности (СФЦ), как универсальной альтернативы деревьям событий, деревьям отказов и графам связности структурно-логических методов моделирования и расчета показателей надежности, безопасности и риска структурно сложных системных объектов и процессов. На простом примере приведены описания методики построения СФЦ и алгоритмических методов автоматического построения логических и вероятностных моделей, реализованные в программных комплексах автоматизированного моделирования надежности безопасности и риска систем.

В последние годы для расчета вероятностных показателей надежности, безопасности и риска функционирования сложных систем используются несколько классов методов структурного анализа. Наибольшее распространение получили методы деревьев событий, деревьев отказов, логико-вероятностные, топологические, ГО-технология, логико-графические и др. [1-4] Независимо от наименования указанные методы имеют общую методологическую основу, которую можно охарактеризовать следующими положениями:

1. Все указанные методы для представления элементов в моделях надежности, безопасности и риска (НБР) систем используют простые (бинарные) случайные события с двумя несовместными исходами (работоспособность – отказ элемента, выполнено - не выполнено действие, включено - не включено устройство и т.п.).
2. Основным способом постановки задач является построение структурной модели (схемы) НБР функционирования исследуемой системы или сценария возникновения аварии.
3. Математической базой моделирования в этих методах выступает алгебра логики.
4. Основной формой представления детерминированной модели НБР системы является логическая функция.
5. На основе логической модели определяются различные виды расчетных вероятностных (аналитических, статистических, марковских) или других моделей количественной оценки различных свойств НБР исследуемой системы.
6. На основе логических и расчетных вероятностных моделей определяются значения показателей свойств надежности безопасности или риска функционирования системы и реализуются различные методики выработки и обоснования исследовательских, проектных, эксплуатационных и других управленческих решений.
7. Все наиболее громоздкие и трудоемкие этапы структурно-логического моделирования (построение логических функций, расчетных вероятностных и других моделей, выполнение расчетов и реализация методик применения результатов) стремятся максимально автоматизировать и реализовать на ЭВМ

В настоящей работе обобщаются результаты опыта разработки и применения одного из новых направлений структурно-логического моделирования надежности безопасности и риска функционирования систем [5-11], в основе которого лежит общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) и специальный аппарат построения структурных моделей, названный схемами функциональной целостности (СФЦ).

Важную роль в успешном развитии теории и практики логико-вероятностного моделирования сыграло то обстоятельство, что по самой своей природе эти методы хорошо приспособлены для полной автоматизации наиболее сложных, трудоемких и громоздких процессов построения расчетных математических моделей различных свойств исследуемых систем. Реализация такой новой информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ) позволило предоставить широкому кругу пользователей программные средства оперативного и многовариантного анализа различных системных объектов и процессов [12,13], модели которых, из-за своей структурной сложности и высокой размерности, не могут быть построены традиционными ручными способами моделирования. Создание таких программных средств основывается на разработке комплекса специальных алгоритмических методов моделирования, позволяющих реализовать на ЭВМ все основные этапы построения логических и вероятностных моделей систем любой заданной структуры.

В настоящем сообщении рассматривается аппарат СФЦ и основные алгоритмические методы моделирования, предназначенные для реализации на ЭВМ всех этапов технологии АСМ. Аппарат СФЦ и алгоритмические методы технологии АСМ иллюстрируются простым примером вероятностного анализа безопасности гипотетического участка железной дороги, схема которого приведена на рис.1.

В этом примере предусматривается учет двух исходных причин возможной аварии - излом рельса и/или возникновение предмета на рельсах. В случае излома рельса и безотказной работы индикатора происходит смена зеленого разрешающего сигнала светофора на запрещающий красный сигнал. Если машинист не допустит ошибки и увидит предмет на рельсах и/или красный сигнал светофора, то включит систему торможения поезда. Тогда, при условии безотказной работы системы торможения, железнодорожная авария будет предотвращена. Требуется построить модели и рассчитать вероятностные характеристики безопасного функционирования участка железной дороги (ж.д.) и возникновения аварии, а также определить значимости и вклады каждого указанного элемента в безопасность рассматриваемой системы в целом.

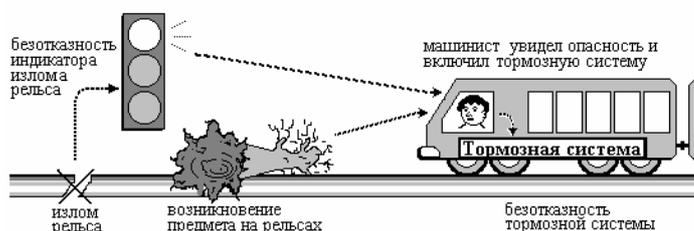


Рис.1. Участок железнодорожного движения

В принципе (с той или иной степенью точности), поставленная задача может быть решена любым из перечисленных выше методов структурного моделирования, что позволяет заинтересованному читателю проверить правильность и оценить эффективность рассматриваемых далее алгоритмических методов технологии АСМ.

## 1. Исходная идея общего логико-вероятностного метода моделирования

Эта идея очень проста и основывается на следующих двух положениях.

1. Все элементы  $i = 1, 2, \dots, N$  моделируемого объекта или процесса представляются простыми, бинарными событиями, которые в процессе функционирования системы могут находиться только в двух состояниях. Такие бинарные модели элементов обозначаются простыми логическими переменными  $\tilde{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$ . Прямое обозначение логической переменной сопоставляется одному, а инверсное - другому возможному исходу соответствующего бинарного события. Собственные вероятностные параметры  $P_i, Q_i = 1 - P_i$  реализации, соответственно, прямого  $x_i$  и инверсного  $\bar{x}_i$  исходов каждого бинарного события считаются заданными непосредственно или определяемыми с помощью известных методик. Так, в рассматриваемом примере (см. рис.1) для вероятностного анализа безопасности участка железной дороги выделено пять бинарных событий. На рис.2 эти события обозначены пронумерованными кружками и сопоставлены фрагментам исследуемого системного процесса.

2. В системе каждый элемент  $i$  может выполнить (или не выполнить) некоторую одну (бывает и несколько) выходную системную функцию. Условия выполнения (реализации) этой функции элементом  $i$  обозначают прямой выходной (интегративной) функцией  $y_i$ , а условия ее не выполнения обозначают интегративной функцией  $\bar{y}_i$ . На рис.3 приведены графические изображения и содержательные описания выходных функций каждого из пяти бинарных элементов рассматриваемого участка железной дороги.

Обоснованное и целенаправленное разделение исследуемой системы на логически связанные совокупности простых бинарных  $\tilde{x}_i \in \{x_i, \bar{x}_i\}$  и сложных функциональных  $\tilde{y}_i \in \{y_i, \bar{y}_i\}$  событий называют в ОЛВМ событийно-логическим подходом к анализу систем [7,8]. Возможность событийно-логического описания системы является необходимым и достаточным условием применимости логико-вероятностных методов для построения модели и анализа различных свойств рассматриваемого системного объекта.

С помощью одной или нескольких выходных функций  $\tilde{y}_i \in \{y_i, \bar{y}_i\}$  представляется то сложное событие, которое, по замыслу автора модели, характеризует исследуемое свойство системы (надежность, безопасность, риск функционирования и т.п.). Простые логические переменные  $\tilde{x}_i$  исходов выделенных бинарных событий используются в качестве параметров формируемых логических моделей, а собственные вероятностные характеристики элементов  $P_i, Q_i$ , - в качестве параметров формируемых расчетных вероятностных моделей исследуемой системы.

Следует отметить, что принципиальным отличием событийно-логического подхода ОЛВМ от классических логико-вероятностных [1] и всех других структурных методов [2-4], является возможность использования в структурных моделях не только прямых  $y_i$ , но и инверсных  $\bar{y}_i$  выходных интегративных функций. Именно это позволило в ОЛВМ и технологии АСМ реализовать все возможности основного аппарата моделирования – алгебры логики на функционально-полном наборе операций "И", "ИЛИ" и "НЕ". На этой основе удалось также полностью автоматизировать процессы построения как всех видов ранее известных монотонных моделей, так и процессы построения принципиально нового класса – немонотонных моделей надежности, безопасности и риска функционирования сложных системных объектов и процессов.

## 2. Основные этапы общего логико-вероятностного моделирования

В логико-вероятностных методах обычно выделяют четыре последовательно выполняемых этапа моделирования. В общем логико-вероятностном методе они имеют следующее содержание:

1. **Первичное структурно-логическое моделирование.** На этом этапе осуществляется полная формализованная постановка задачи логико-вероятностного моделирования, которая состоит из трех взаимосвязанных частей:

1.1. На основе выделенной совокупности простых бинарных  $\tilde{x}_i$  и сложных функциональных  $\tilde{y}_i$  событий разрабатывается схема функциональной целостности  $G(X,Y)$  исследуемой системы. Здесь  $X$  обозначает множество вершин (бинарных событий  $\tilde{x}_i$ ), а  $Y$  - множество связывающих их ребер

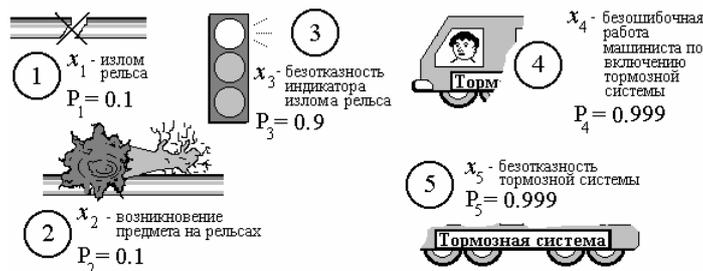


Рис.2. Примеры бинарных моделей элементов

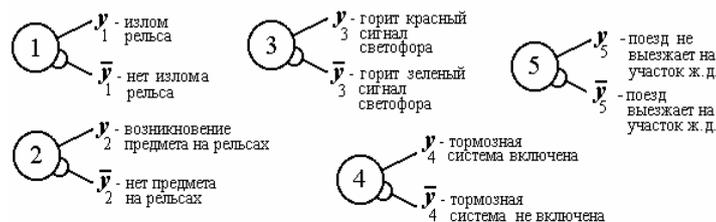


Рис.3. Описания выходных (интегративных) функций

(выходных и обеспечивающих функций  $\tilde{y}_i$ ). СФЦ должна быть аналитически точным и строго формализованным отображением всех знаний о том, при каких условиях реализует (или не реализует) свои выходные функции каждый элемент рассматриваемой системы.

1.2. С помощью одной или нескольких интегративных функций задается так называемый логический критерий функционирования (ЛКФ) исследуемой системы  $Y_c = Y_c(\{\tilde{y}_i\}, i=1, 2, \dots, N)$ .

Этот критерий определяет (в обобщенном виде) тот режим работы или использования системы, математическую модель которого необходимо построить для количественной оценки исследуемого свойства системы в целом. Сложные и многофункциональные системные объекты могут характеризоваться не одним, а несколькими логическими критериями, для каждого из которых должны строиться свои математические модели системы.

1.3. Непосредственно или опосредованно определяются исходные вероятностные  $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $b$  и другие параметры всех бинарных событий  $\tilde{x}_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ , представляющих элементы моделируемой системы.

**2. Определение логической функции работоспособности системы.** На этом, втором этапе ОЛВМ осуществляется построение детерминированной логической модели процесса функционирования исследуемой системы  $Y_c = Y_c(\{x_i, \bar{x}_i\}, i=1, 2, \dots, N)$ . Она представляет собой так называемую логическую функцию работоспособности системы (ФРС) или логическую функцию переходов (ЛФП). Аргументами этой логической функции являются простые бинарные события  $\tilde{x}_i$ , собственные вероятностные параметры  $P_i$ ,  $Q_i$  которых известны. В этой функции, с помощью логических сумм, произведений и дополнений (инверсий) простых случайных событий, точно и однозначно определяется сложное случайное событие реализации системой заданного критерия ее функционирования, т.е. моделируемое свойство надежности, безопасности или риска исследуемой системы в целом. Следует отметить, что в ОЛВМ (в отличие от известных структурных методов [1-4]) СФЦ ЛКФ и ФРС не ограничены условием монотонности [1] и могут представлять и кратчайшие пути успешного функционирования (КПУФ) и минимальные сечения отказов (МСО) и любые их немонотонные комбинации.

**3. Определение расчетной вероятностной модели системы.** На этом, третьем этапе ОЛВМ осуществляется преобразование логической ФРС (и/или ЛФП) в одну из форм, позволяющих непосредственно выполнять расчеты вероятностных и других показателей надежности, безопасности и риска исследуемой системы  $P_c = P_c(\{P_i, Q_i, t\}, i=1, 2, \dots, N)$ . В настоящее время в ОЛВМ разработаны методы получения четырех форм расчетных вероятностных моделей: многочленов вероятностных функций [5-11], логико-статистических моделей [13], некоторых видов марковских [6,8] и сетевых (комбинаторно-последовательных) [9,11] моделей систем.

**4. Выполнение расчетов системных характеристик.** На этом заключительном этапе ОЛВМ с помощью полученных расчетных моделей вычисляются показатели, необходимые для решения различных задач системного анализа НБР. Результаты расчетов могут использоваться, например, для нормативной оценки свойств системы, сравнения и выбора вариантов ее структуры, оптимизации и синтеза систем в процессе выполнения научных исследований, проектирования, эксплуатации, выработки и обоснования управленческих решений в области надежности, безопасности и риска функционирования исследуемых объектов.

Этап первичного структурно-логического моделирования в своей содержательной, творческой части, конечно, не может быть автоматизирован. Здесь автоматизации подлежат только его сервисные составляющие. Однако, все последующие и наиболее громоздкие этапы логического, вероятностного моделирования и расчетов в ОЛВМ автоматизированы полностью [9,10,12,13]. Это стало возможным только после разработки алгоритмических методов моделирования, т.е. обеспечения очень высокого, машинного уровня формализма не только способов представления исходных, промежуточных и конечных данных, но, главное, собственно процедур построения логико-вероятностных математических моделей систем. На наиболее важных постановочных и процедурных способах формализации ОЛВМ мы остановимся подробнее.

#### 4. Алгоритмические методы этапа первичного структурно-логического моделирования

Центральное место в первичном моделировании, безусловно, занимает процесс построения СФЦ. Средства представления СФЦ должны, с одной стороны, соответствовать возможностям аппарата логико-вероятностного моделирования (алгебре логики и теории вероятности), а с другой, иметь уровень формализма, достаточный для полной автоматизации всех последующих этапов ОЛВМ.

Частично аппарат СФЦ мы уже использовали (см. рис.3), при описании выходных функций элементов участка железной дороги рассматриваемого примера. В полном объеме изобразительные средства аппарата СФЦ приведены на рис.4.

Прежде всего, отметим, что в СФЦ сохранены все способы представления структур систем, которые традиционно использовались в деревьях событий, деревьях отказов и графах связности (последовательное, параллельное соединение элементов и циклы). Вместе с тем, в СФЦ введены новые средства графического описания систем, обеспечивающие полную реализацию всех возможностей алгебры логики.

Функциональные вершины СФЦ предназначены для представления элементов  $i$  моделируемой системы с помощью прямого исхода  $x_i$  соответствующего бинарного события (см., например, рис.2). Фиктивные вершины не представляют элементов, но позволяют отобразить на графе сложные логические условия, связи отношения между элементами в исследуемой системе.

На выходе каждой вершины СФЦ (и функциональной и фиктивной) могут быть два типа выходных ребер – прямые  $y_i$  (обозначают реализацию выходной функции элемента) и инверсные  $\bar{y}_i$  (обозначают не реализацию выходной функции).

Реализация или не реализация выходной функции  $\bar{y}_i \in \{y_i, \bar{y}_i\}$  определяется как собственным состоянием соответствующего элемента  $\bar{x}_i \in \{x_i, \bar{x}_i\}$ , так и, в общем случае, определенными совокупностями выходных функций  $\bar{y}_j \in \{y_j, \bar{y}_j\}$  ряда других, обеспечивающих элементов  $j$  системы. На графе СФЦ логические условия обеспечения представляются ребрами, которые заходят в данную вершину СФЦ. Направленность ребер обозначается или точкой (конъюнктивное ребро), или стрелкой (дизъюнктивное ребро). Конъюнктивные ребра определяют не резервированную, а дизъюнктивные - резервированную группы функций обеспечения. С аппарате СФЦ между конъюнктивной и дизъюнктивной группами обеспечения установлена конъюнктивная связь. Это означает, что прямая выходная функция  $y_i$  вершины  $i$  СФЦ будет реализована только в том случае, если собственное событие  $x_i$  свершилось "И" реализованы все без исключения заходящие интегративные функции  $\bar{y}_k$  конъюнктивной группы, "И" реализована хотя бы одна заходящая функция  $\bar{y}_d$  дизъюнктивной группы.

Реализация инверсной выходной функции элемента определяется полной логической инверсией всех графически отображенных условий реализации прямой выходной функции.

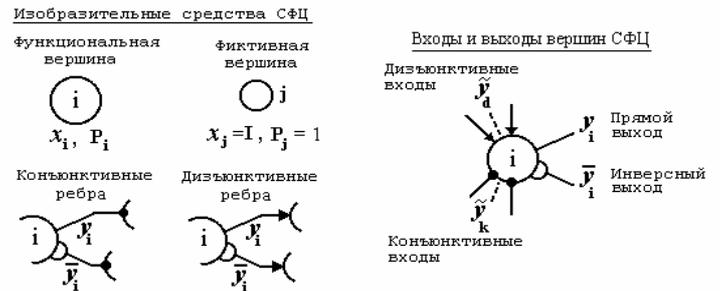


Рис.4. Аппарат схем функциональной целостности ОЛВМ

Сказанное может быть представлено обобщенным структурным фрагментом СФЦ и двумя базовыми логическими уравнениями, изображенными на рис.5. Таким образом, по построению аппарат СФЦ реализует все возможности алгебры логики и является аналитически строгой графической формой записи системы логических уравнений. Такую систему всегда можно записать по графу СФЦ на основе соотношений (1).

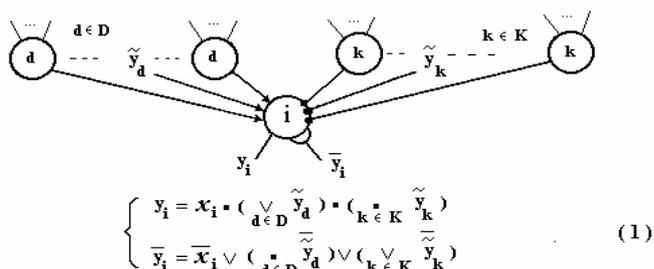


Рис.5. Обобщенный фрагмент и базовые логические уравнения СФЦ

Процесс построения СФЦ включает в себя ряд неформальных (творческих) процедур, например, выделения бинарных событий (моделей элементов системы), вычисления их вероятностных характеристик, определения содержания выходных функций элементов и графического отображения логических условий их реализации. На практике бывает удобно условия реализации выходных функций элементов сначала определить фрагментарно (отдельно для каждой вершины), а уже затем объединить их в общую СФЦ системы в целом.

На рис.6 приведены графические фрагменты условий реализации выходных функций каждым элементом рассматриваемого участка железной дороги, необходимые для анализа его безопасности. Формулировка этих условий основывалось на знании исследуемой системы в целом (см.рис.1), определения смыслового содержания выделенных бинарных событий (см.рис.2), прямых и инверсных выходных функций каждого элемента (см.рис.3), использовании изобразительных средств схем функциональной целостности (см.рис.4) и базовых логических уравнений (1). Смысловое содержание всех фрагментов СФЦ, указанных на рис.6, можно определить следующим образом.

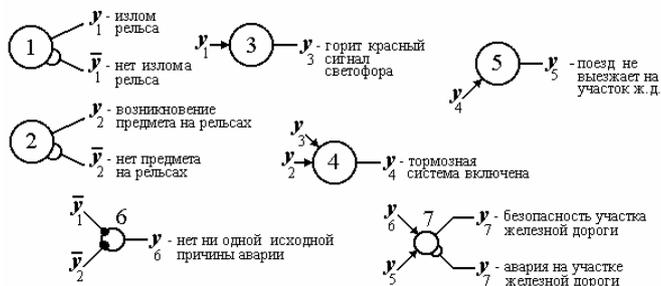


Рис.6. Фрагменты условий реализации выходных функций

1. В формируемой модели не предусматривается учет каких-либо конкретных причин возникновения исходных опасностей  $\tilde{y}_1$  и  $\tilde{y}_2$ . Поэтому достаточными условиями реализации этих выходных функций являются только соответствующие собственные бинарные события  $\tilde{x}_1$  и  $\tilde{x}_2$  (излом рельса, возникновение предмета на рельсах). Такие вершины СФЦ называют головными, поскольку в них не заходит ни одного ребра функционального обеспечения.
2. Необходимым внутренним (собственным) условием реализации прямой выходной функции  $y_3$  (горит красный сигнал светофора) является безотказная работа индикатора  $x_3$  "И" реализация функции  $y_1$  возникновения излома рельса.
3. Функция  $y_4$  (включение тормозной системы поезда) реализуется при безошибочной работе машиниста  $x_4$  "И" обеспечивается хотя бы одним из двух условий: "ИЛИ" горит красный сигнал светофора ( $y_3$ ), "ИЛИ" имеется предмет на рельсах ( $y_2$ ).
4. Поезд не выезжает на опасный участок железной дороги ( $y_5$ ), если тормозная система была своевременно включена ( $y_4$ ) "И" включенная тормозная система не отказала ( $x_5$ ).
5. Для целенаправленного анализа безопасности с помощью фиктивных вершин 6 и 7 на рис.6 выполнены две группировки интегративных функций. Функция  $y_6 = \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2$  определяет полное отсутствие исходных причин возникновения ж.д. аварии. Прямая функция  $y_7 = y_6 \vee y_5$  определяет два возможных варианта безопасного функционирования рассматриваемого участка ж.д.:  $y_6$  - реализуется при полном отсутствии возможных причин аварии, "ИЛИ"  $y_5$  - реализуется при всех возможных вариантах правильной (штатной) работы системы безопасности в условиях

возникновения хотя бы одной исходной причины аварии. Естественно, что полная инверсия условий безопасности ( $\bar{y}_7$ ) должна соответствовать всем возможным вариантам событий, которые неизбежно приводят к железнодорожной катастрофе на рассматриваемом участке.

Теперь осталось только объединить все фрагменты, приведенные на рис.6, и получаем законченную схему функциональной целостности структурной модели безопасности исследуемого участка железной дороги. Эта СФЦ и соответствующая ей система логических уравнений, приведены на рис.7.

На заключительном этапе первичного структурно-логического моделирования определяются вероятностные параметры ( $P_i$ ,  $i=1,2,\dots,N$ ) элементов (в примере они указаны на рис.7) и задаются логические критерии функционирования исследуемой системы. В рассматриваемом примере целью моделирования является вероятностный анализ безопасности или аварии участка железной дороги. Соответствующие модели могут быть получены в ОЛВМ на основе СФЦ, приведенной на рис.7 и любого из следующих двух логических критериев функционирования:

$$Y_{c1} = y_7 - \text{критерий безопасности}; \quad (2)$$

$$Y_{c2} = \bar{y}_7 - \text{критерий возникновения аварии}. \quad (3)$$

Все рассмотренные формы представления исходных данных общего логико-вероятностного метода моделирования легко представимы в ЭВМ (см., например, [12]) и являются основой для полной автоматизации всех последующих этапов построения расчетных математических моделей.

### 5. Универсальный графоаналитический метод определения логических ФРС в ОЛВМ

На этапе логического моделирования в ОЛВМ определяется логическая функция работоспособности системы, которая должна точно соответствовать СФЦ системы и заданному логическому критерию ее функционирования.

$$\{ \text{СФЦ}, \text{ЛКФ} \} \Rightarrow Y_c = Y_c(\{ x_i, \bar{x}_i \}, i=1,2,\dots,N). \quad (4)$$

Для точного решения на ЭВМ задачи (4) был разработан универсальный графоаналитический метод определения всех видов монотонных и немонотонных логических ФРС по любой СФЦ (системе логических уравнений) и любому логическому критерию функционирования. В этом методе также учитываются группы несовместных событий (ГНС) и логические последовательности событий [9,11]. Основное содержание универсального графоаналитического метода определяется следующими положениями.

Логическая ФРС определяется способом подстановки, путем последовательного раскрытия всех интегративных функций заданного ЛКФ по схеме функциональной целостности

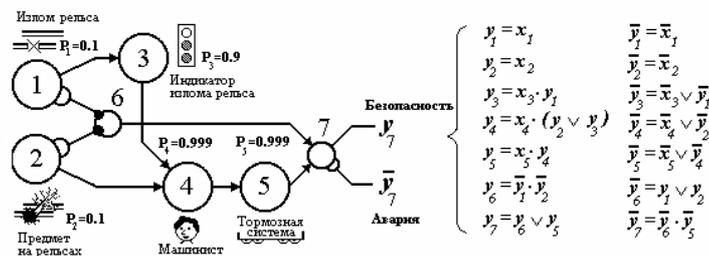


Рис.7. СФЦ и система логических уравнений модели безопасности участка железной дороги

Таблица 1. Виды узлов дерева решений

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

системы с помощью базовых логических уравнений (1). Определение конъюнкций ФРС осуществляется методом обратного поиска в глубину, реализованного в форме построения столбцов специального дерева решений системы логических уравнений, представляющей СФЦ системы. Для построения дерева решений используется специальный символичный аппарат. Состав и описание его символов приведены в таблице 1. На рис.8 и рис.9 приведены два дерева решений системы логических уравнений (СФЦ) на рис.7 по критериям (2) и (3) соответственно

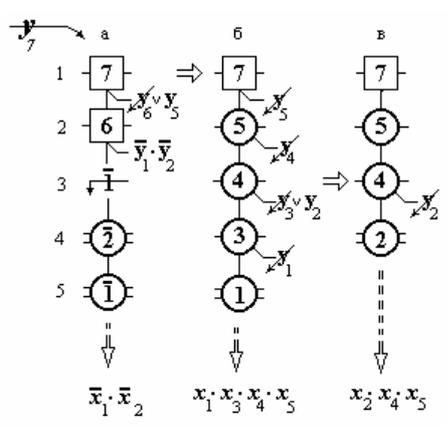


Рис.8. Дерево решений для определения логической функции безопасности

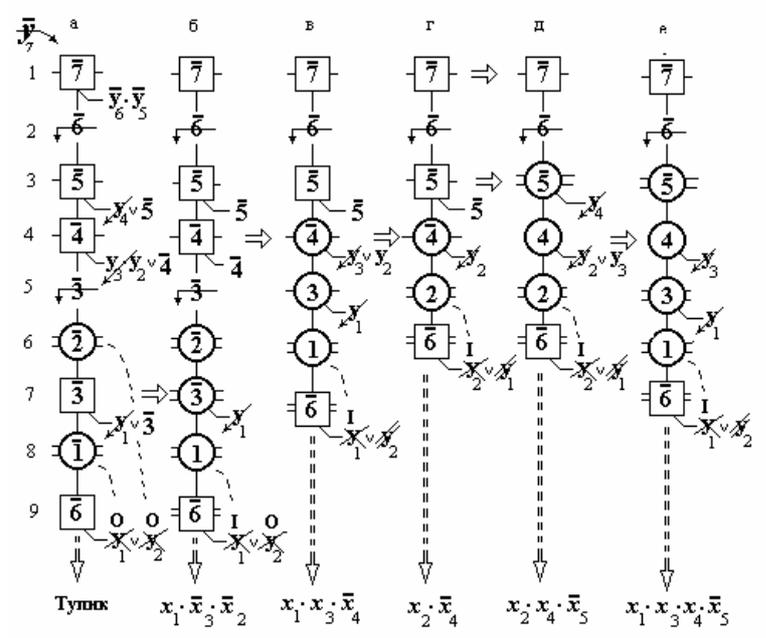


Рис.9. дерево решений для логической функции аварии

Укрупненный алгоритм универсальной процедуры определения логических ФРС включает в себя следующие основные пункты.

**Начало**

- 1. Обработка ЛКФ.** Из ЛКФ очередная слева конъюнкция интегративных функций  $\tilde{y}_i$  переписывается в очередной новый столбец дерева решений, в виде последовательности исходных узлов (см. таб.1, п.1), и далее выполняется п.2. Если в ЛКФ конъюнкций больше нет, то построение дерева решений завершено и осуществляется переход к п. 9 алгоритма.
- 2. Формирование функции обеспечения.** В столбце дерева решений первый снизу исходный узел принимается к раскрытию и обводится кружком или квадратом (см. таб.1, п.2, 3). На ответвлении узла записывается функция обеспечения (ФО). Для головных вершин СФЦ ФО считается равной 1 (логической единице). Для остальных вершин прямые ФО включают в себя правые части логических уравнений (см. рис.7) СФЦ без простых переменных  $\tilde{x}_i$  (см., например, рис.8, а.1, а.2, б.3). Для принятых к раскрытию инверсных интегративных функций  $\bar{y}_i$  функциональных вершин СФЦ признак собственной инверсии записывается в ФО последним справа (см., например, рис.9, а.4, а.7).
- 3. Обработка функции обеспечения.** Все составляющие ФО проверяются на цикличность, раскрытость и логические противоречия по правилам, которые соответствуют законам алгебры логики, способам учета групп несовместных событий и логических последовательностей. В ходе проверки циклические и противоречивые интегративные функции  $\tilde{y}_i$  в ФО заменяются логическими нулями (см.рис.9, а.9, б.9), а раскрытые - логическими единицами (см. рис.9, б.9, в.7, г.6, д.6, е.7). Затем ФО преобразуется по законам алгебры логики. Если ФО стала равна логическому нулю (см. рис.9, а.9), то построение столбца прекращается (Тупик) и осуществляется переход к п.8. Если ФО стала равной логической единице, то раскрываемый

узел дерева решений переводится в собственно раскрытый (см. таб.1, п.4, 5) и далее выполняется п.5. Во всех других случаях переходим к п.4.

4. **Смещение конъюнкции ФО.** Из ФО выбирается первая слева конъюнкция интегративных функций  $\bar{y}_i$  и переписывается в конец данного столбца дерева решений, в виде последовательности исходных узлов (на рис.8, 9 все смещаемые конъюнкции перечеркнуты наклонными стрелками). Далее выполняется п.2 (главный цикл).
5. **Преобразование столбца по собственно раскрытому узлу.** Все вышестоящие узлы столбца последовательно (снизу вверх) преобразуются по следующим правилам. Собственно раскрытые, раскрытые по обеспечению и смещенные узлы (см.таб.1) пропускаются. Принятые к раскрытию действительные и условные узлы переводятся в раскрытые по обеспечению (см.таб.1, п.6, 7). Если преобразована вся вышестоящая часть столбца, то построение очередной конъюнкции ФРС завершено и переходим к п.7. Если в процессе преобразования встретился исходный узел, то далее выполняется п.6.
6. **Обработка исходного узла.** Если нижний собственно раскрытый узел столбца соответствует головной вершине СФЦ, то встретившийся исходный узел зачеркивается угловой стрелкой (см.,таб.1, п. 8) и переписывается в нижнюю часть формируемого столбца (см.рис.8, а.3). Затем выполняется п.2. Если же нижний собственно раскрытый узел столбца инверсирован и не соответствует головной вершине СФЦ, то (при необходимости учета последовательностей) для этого узла формируется прямая ФО (см.рис.9, п. в.4, д.3) и далее переходим к п.3.
7. **Считывание конъюнкции.** Сформированная в столбце очередная конъюнкция искомой ФРС содержит логические переменные, номера которых указаны к действительных узлах (см.таб.1 п. 4, 6). Если эти конъюнкции переписать из столбца упорядоченно (снизу вверх), то в них будет сохранен учет реальных последовательностей событий. На рис.8, 9 под каждым столбцом записаны (стрелки вниз) упорядоченные конъюнкции ФРС безопасности и аварии. Далее выполняется п. 8.
8. **Поиск ответвлений.** Узлы столбца просматриваются последовательно, снизу вверх. Те узлы, у которых нет ФО, удаляются и, соответственно, восстанавливаются предыдущие уровни раскрытия узлов вышестоящей части столбца. Если удалены все узлы (ответвлений не найдено), то переходим к п. 1. Если обнаружено первое снизу ответвление (на рис.8, 9 отмечены горизонтальными стрелками), то переходим к п. 4.
9. **Преобразование ФРС.** Выполняются минимизирующие преобразования полученной ФРС и ее приведение к форме, удобной для дальнейшего применения (например, учитывающей наличие ГНС, логических последовательностей, различные начальные состояние системы и т.п.).

### Конец

Полученные с помощью графоаналитического метода логические ФРС безопасности (см.рис.8) и аварии (см.рис.9) составляют:

$$\text{Безопасность} - Y_{c1} = y_7 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (5)$$

$$\text{Авария} - Y_{c2} = \bar{y}_7 = x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \quad (6)$$

Еще раз отметим, что рассмотренный графоаналитический метод решения систем логических уравнений является строго формализованным и аналитически универсальным. Это позволило, во-первых, реализовать в ОЛВМ все возможности алгебры логики и решать на с помощью программных комплексов [14-17] все без исключения известные задачи монотонного логико-вероятностного моделирования, а также строить принципиально новые немонотонные логико-вероятностные модели функционирования сложных объектов и процессов. Во-вторых, удалось выйти за границы классической алгебры логики и учесть два важных вида зависимостей - группы несовместных событий и логические последовательности событий во времени. Так, в полученных ФРС (5), (6) представлены все возможные комбинации исходных опасностей (события  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ ), а также минимальные безопасные (5) и аварийные (6) последовательности событий функционирования элементов системы обеспечения безопасности движения ( $\bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5$ ). Эти комбинаторные последовательности определяют все (в рамках принятых допущений)

варианты правильного, т.е. безопасного функционирования системы (5) и все варианты возникновения аварийных ситуаций, неизбежно приводящих к ж.д. аварии. Учет последовательностей позволяет не только получать расчетные вероятностные модели, но также ставить и решать задачи детерминированного управления безопасностью систем.

### 6. Комбинированный метод построения многочленов вероятностных функций в ОЛВМ

На этапе вероятностного моделирования в ОЛВМ автоматизированы процессы построения нескольких видов расчетных моделей. Здесь мы остановимся только на основных положения алгоритмического метода построения многочленов вероятностных функций (ВФ), который получил наименование комбинированного метода [6-12].

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

$$Y_c = Y_c(\{x_i, \bar{x}_i\}, i=1,2,\dots,N) \Rightarrow P_c(\{P_i, Q_i\}, i=1,2,\dots,N) \quad (7)$$

Для точного решения задачи (7) комбинированным методом производятся, в общем случае, два вида преобразований исходной ФРС  $Y_c$ . Сначала осуществляется квазиортогонализация по одной логической переменной, а затем выполняется символьный переход к многочлену искомой ВФ. При допущении о независимости в совокупности всех элементарных бинарных событий  $\bar{x}_i, i=1,2,\dots,N$  правила выполнения этих двух этапов состоят в следующем:

#### 6.1. Правила квазиортогонализации по одной переменной

Все пары не ортогональных конъюнкций ФРС проверяются на возможность их ортогонализации по следующему закону

$$\gamma \cdot \bar{x}_i \vee \gamma \cdot \varphi = \gamma \cdot x_i \vee \gamma \cdot \varphi \cdot \bar{x}_i \quad (8)$$

Здесь  $\gamma$  и  $\varphi$  части проверяемых конъюнкций, в которых отсутствует переменная  $\bar{x}_i$ . Ортогонализирующее преобразование (8) не увеличивает общего числа конъюнкций исходной ФРС. Выполнив указанные преобразования над функциями (5) и (6), получаем:

$$Y_{c1} = y_7 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot x_5; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Y_{c2} = \bar{y}_7 &= x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 = \\ &= x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_2. \end{aligned} \quad (10)$$

#### 6.2. Правила символьного перехода к многочлену вероятностной функции

Логическая ФРС здесь рассматривается как строгая аналитическая форма определения того сложного случайного события, вероятность которого надо правильно рассчитать с помощью искомой ВФ. В указанном смысле операция конъюнкции представляет произведение, дизъюнкция - сумму, а инверсия - дополнения простых случайных событий, вероятностные параметры которых известны. Поэтому для получения многочлена ВФ достаточно выполнить символьные преобразования обозначений логических переменных и операций в обозначения вероятностных переменных и арифметических операций в точном соответствии с законами теории вероятностей. Полный набор таких правил символьного перехода от ФРС к ВФ приведен на рис.10.

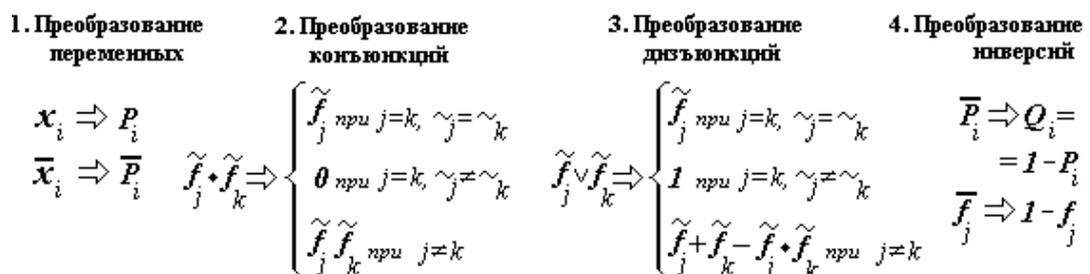


Рис.10. Правила символьного преобразования ФРС в ВФ

При полной ортогональности ФРС указанные символьные преобразования точно совпадают с известными правилами прямого замещения. Преобразуя ФРС (9) и (10) в многочлены ВФ, получаем:

$$\text{Вероятность безопасности} - P_{c1} = P\{y_7\} = Q_1Q_2 + P_1P_3P_4P_5Q_2 + P_2P_4P_5; \quad (11)$$

$$\text{Вероятность аварии} - P_{c2} = P\{\bar{y}_7\} = P_1Q_3Q_2 + P_1P_3Q_4Q_2 + P_2Q_4 + P_2P_4Q_5 + P_1P_3P_4Q_5Q_2. \quad (12)$$

В ОЛВМ с помощью методов учета ГНС реализована возможность использования в моделях надежности, безопасности и риска систем элементов с любым числом собственных состояний и стохастическими зависимостями. При этом изменяются некоторые законы алгебры логики и правила построения многочленов вероятностных функций [6,8,10].

### 7. Расчет типовых вероятностных характеристик систем

Автоматически формируемые многочлены ВФ сами по себе являются алгоритмами вычисления общих системных вероятностных характеристик. Так, подставляя в (11) и (12) значения вероятностных параметров элементов (см. рис.7), получаем:

$$\text{Вероятность безопасности участка ж.д.} - P_{c1} = P\{y_7\} = 0.99064 \quad (13)$$

$$\text{Вероятность аварии на участке ж.д.} - P_{c2} = P\{\bar{y}_7\} = 0.00936 \quad (14)$$

Для выработки и обоснования различных управленческих решений большое значение имеют объективные оценки той роли, которую играют различные элементы в обеспечении общего системного показателя надежности, безопасности или риска функционирования системы. В ОЛВМ для этих целей применяются показатели значимости и вкладов отдельных элементов [1,10]. Эти показатели определяют, на сколько изменится общесистемная характеристика  $P_c$ , если различными способами изменять значения отдельных параметров элементов  $P_i$ . Результаты расчетов показателей роли отдельных элементов, рассматриваемого примера, приведены на рис.11

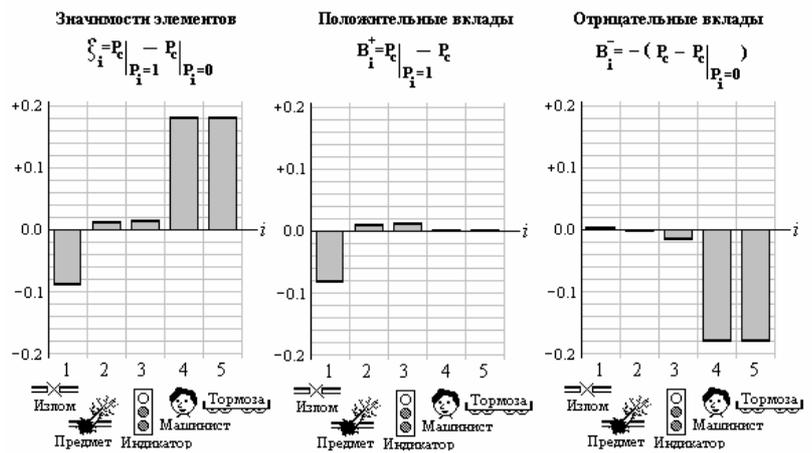


Рис.11. Результаты расчетов значимостей и вкладов элементов

### Заключение

За последние годы накоплен определенный научный и практический опыт разработки и применения теории, технологии и программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета показателей НБР систем различных видов классов и назначения. Реализация в ОЛВМ всех возможностей основного аппарата моделирования – алгебры логики позволила автоматизировать процессы построения не только всех моделей, представляемых деревьями событий, отказов и графами связности, но ставить и решать многие принципиально новые и актуальные задачи структурного анализа надежности, безопасности и риска сложных систем. На основе дальнейшего развития рассмотренных алгоритмических методов в настоящее время удалось автоматизировать процессы построения ряда новых классов математических моделей систем - статистических, Марковских и сетевых. Реализована возможность учета в формируемых моделях зависимых событий, наличие в системах элементов с любым числом собственных состояний, различных последовательностей случайных событий во времени. С использованием теории и технологии АСМ разработано и защищено уже несколько десятков диссертаций. В ОАО "СПИК СЗМА" в этом году выполнены первые успешные расчеты надежности и отказоустойчивости автоматизированной системы управления технологическими процессами на стадии проектирования. Начата разработка коммерческого образца программного

комплекса АСМ СЗМА. Планируется, что в данном программном комплексе будут реализованы самые последние достижения в технологии АСМ и по своим основным характеристикам он сможет превзойти известную программную систему автоматизированного моделирования и расчета надежности и безопасности Risk Spectrum фирмы Relcon AB, работающую в технологии "деревьев отказов".

#### Литература

1. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. // СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
2. А.И.Гражданкин, М.В.Лисанов, А.С.Печеркин. Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов. // Безопасность труда в промышленности - 2001. - №5. –С. 33-36.
3. Э.Дж.Хенли, Х.Кумамото. Надежность технических систем и оценка риска. // М.: Машиностроение, 1984.
4. РД 03-418-01. Методические рекомендации по проведению анализа риска опасных производственных объектов. Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности, охраны недр. Госгортехнадзор России, 2001. –20 с.
5. Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности структурно-сложных систем. // Л.:ВМА, 1988.
6. Можяев А.С. Theory and practice of automated strYctYral-logical simYlation of system. International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97). Tom 3. St.PetersbYrg: SPIRAS, 1997, p.1109-1118.
7. Можяев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. // СПб. ВИТУ, 2000. –145 с.
8. Можяев А.С. Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем. Часть-I. // В сб.: Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Вып.1. Под редакцией И.А. Рябинина. Препринт 101. - СПб.: ИПМАШ РАН, 1994, с.23-53.
9. Можяев А.С. Технология автоматизации процессов построения логико-вероятностных моделей систем. // Труды Международной научной конференции "Интеллектуальные системы и информационные технологии в управлении". ИСИТУ-2000, IS@ITC. -Псков: ППИ, 2000, с.257-262.
10. Черкесов Г.Н., Можяев А.С. Логико-вероятностные методы расчета надежности структурно-сложных систем. // В сб. Качество и надежность изделий. Вып.3(15) М.:Знание, 1991.
11. Можяев А.С. Учет временной последовательности отказов элементов в логико-вероятностных моделях надежности. // Межвузовский сборник: Надежность систем энергетики. - Новочеркасск: НПИ, 1990, с. 94-103.
12. Можяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной Научной Школы "Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах" (МА БРК – 2001). СПб.: Издательство ООО "НПО "Омега", 2001, с.56-61/
13. Можяев А.С., Алексеев А.О. Громов В.Н. Автоматизированное логико-вероятностное моделирование технических систем. // Руководство пользователя ПК АСМ, версия 5.0. СПб.: ВИТУ, 1999.