

2.7. Расчет безопасности участка железной дороги

2.7.1. Описание задачи

На рис. 2.7.1 приведена функциональная схема участка железной дороги (ж.д.), для которой требуется построить математическую модель и рассчитать вероятностные показатели ее безопасности, аварии и риска функционирования.



Рис. 2.7.1. Схема участка железной дороги

В рассматриваемом примере предусматривается учет двух исходных причин возможной аварии - излом рельса и/или возникновение предмета на рельсах. Если произошли события излома рельса и безотказной работы системы индикации излома рельса, то зеленый разрешающий сигнал светофора изменяется на запрещающий красный сигнал. Если машинист не допустит ошибки и увидит предмет на рельсах и/или красный сигнал светофора, то он включит систему торможения поезда. Тогда, при условии безотказной работы системы торможения, ж.д. авария будет предотвращена.

Требуется построить модели и рассчитать вероятностные характеристики безопасного функционирования участка железной дороги и возникновения аварии. Также требуется определить значимости и вклады каждого отдельного элемента (излом рельса, предмет на рельсах, индикатор излома, машинист, тормозная система) в показатель безопасности рассматриваемого участка ж.д.

2.7.2. Результаты решения на ПК «RELEX»

Дерево безопасности участка железной дороги набранное в редакторе задания модели Relex Fault Tree, приведено на рис. 2.7.2. На рис. 2.7.3 приведено дерево аварии.

Расчет проведен при следующих исходных данных:

- вероятность исправного состояния рельса $P_1=0.9$;
- вероятность отсутствия предмета на рельсах $P_2= 0.9$;
- вероятность правильных действий человека $P_4= 0.999$;
- вероятность исправного состояния тормозов $P_5= 0.999$;
- вероятность безотказной работы светофора $P_3= 0.9$.

В результате расчета получены:

- вероятность отсутствия аварии $P_{\text{безопасности}} = 0.990638$,
- вероятность возникновения аварии $P_{\text{аварии}} = 0.00936182$.

Проведен также расчет при других исходных данных. Результат - в сводной таблице.

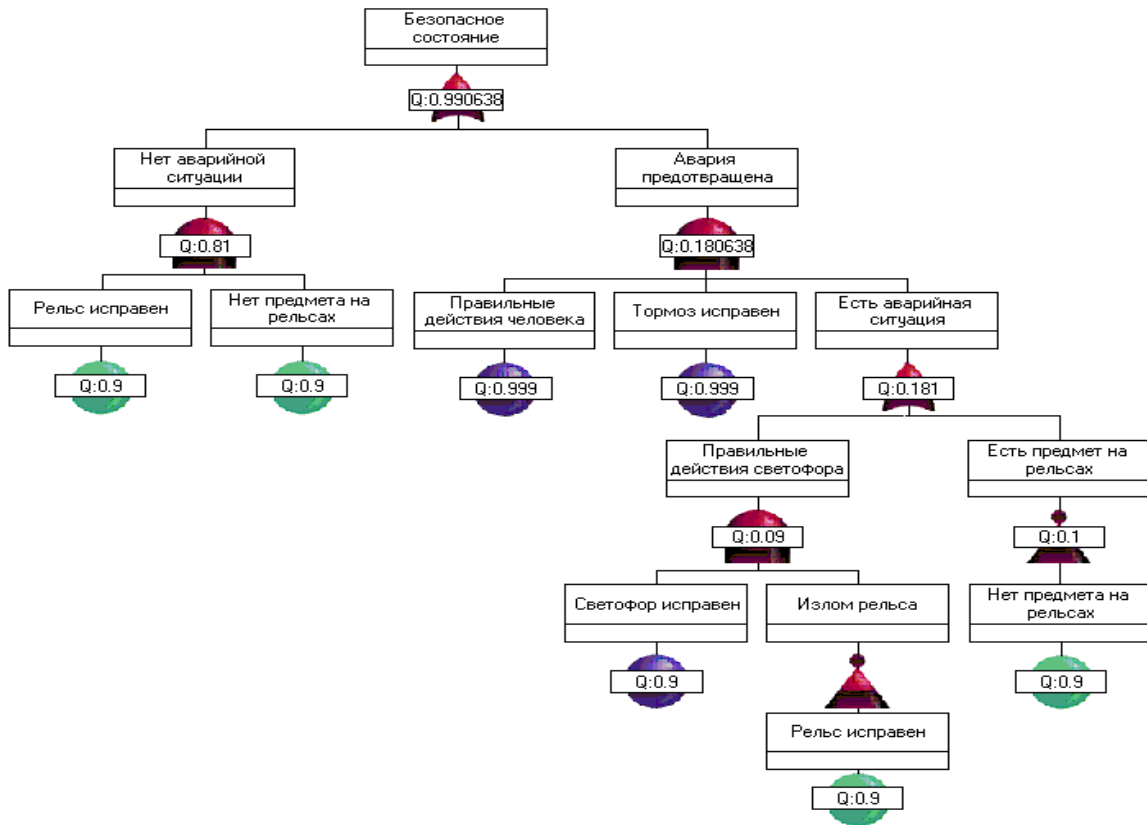


Рис. 2.7.2. Дерево безопасности участка жд, набранное в редакторе Relex Fault Tree

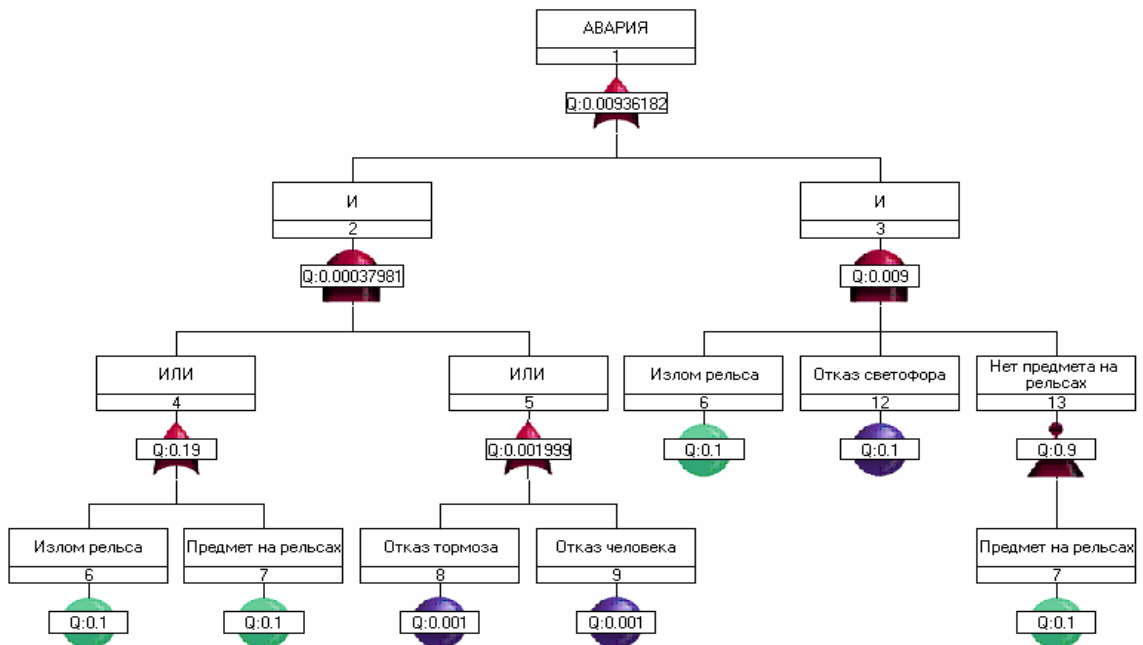


Рис. 2.7.3. Дерево аварии участка железной дороги, набранное в редакторе Relex Fault Tree

2.7.3. Результаты решения на ПК «АСМ»

На примере решения данной задачи проиллюстрируем более детально, чем ранее, содержание методики постановки задач и построения СФЦ, которая используется в общем логико-вероятностном методе технологии автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования сложных систем.

1. Определение элементов структурной модели

В целях построения СФЦ рассматриваемой системы (см. рис. 2.7.1) можно выделить пять элементов $i = 1, 2, \dots, 5$, которые представляются бинарными событиями и с достаточной, по мнению разработчика, точностью характеризуют безопасность данного участка ж.д. Состав бинарных элементов и заданные их вероятностные параметры приведены на рис.2.7.4.

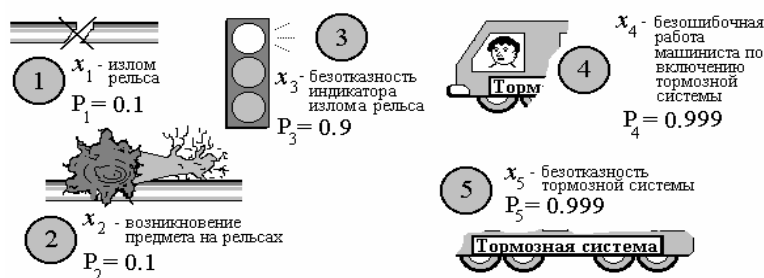


Рис.2.7.4. Состав бинарных элементов для модели безопасности участка железной дороги

Здесь события излома рельса (1) и возникновение предмета на рельсах (2) относятся к инициирующим событиям возможной аварии на рассматриваемом участке ж.д. События безотказной работы индикатора излома рельса (3), тормозной системы (5) и безошибочности действий машиниста (4) определяют безотказность системы обеспечения безопасности на данном участке ж.д.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СФЦ НА ОСНОВЕ ПРЯМОЙ ЛОГИКИ РАССУЖДЕНИЙ

Все выделенные бинарные события системы в СФЦ представляются функциональными вершинами, с номерами $i = 1, 2, \dots, 5$. В логической модели они обозначаются простыми логическими переменными $\bar{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$, а в вероятностной модели - собственными вероятностными параметрами $p_i, q_i = 1 - p_i$ реализации, соответственно, прямого x_i и инверсного \bar{x}_i исходов каждого бинарного события. Для правильного построения СФЦ важно четко определить (и далее не изменять!), смысловое содержание каждого выделенного бинарного события. В рассматриваемом примере все эти данные указаны на рис.2.7.4.

2. Определение выходных функций элементов и условий их реализации в системе

На рис. 2.7.5 приведены графические изображения и краткие содержательные описания выходных функций каждого из пяти бинарных элементов (событий) участка ж.д.

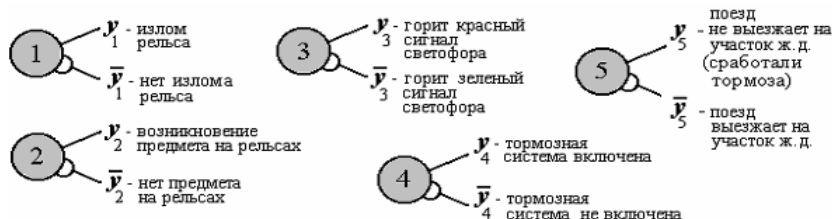


Рис. 2.7.5. Описания выходных функций элементов

3. Логические условия реализации выходных функций элементов

На этом этапе, необходимо определить и графически отобразить логические условия реализации в системе указанных выше выходных функций всех элементов. Фрагментарно эти условия представлены и описаны на рис.2.7.6.

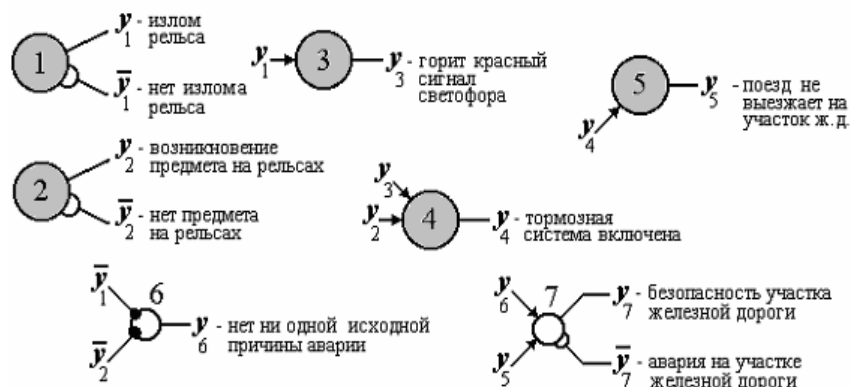


Рис. 2.7.6. Фрагменты условий реализации выходных функций элементов

Определение и графическое представление этих условий основывалось на знании правил функционирования элементов в исследуемой системе в целом (см. рис. 2.7.1), смыслового содержания выделенных бинарных событий (см. рис. 2.7.4), прямых и инверсных выходных функций каждого элемента (см. рис. 2.7.5), а также изобразительных средств СФЦ и базовых логических соотношениях ОЛВМ. Определим смысловое содержание всех фрагментов СФЦ, приведенных на рис.2.19:

1. В формируемой модели не рассматриваются какие либо дополнительные условия возникновения или не возникновения исходных причин \bar{y}_1 и \bar{y}_2 возможной аварии на участке ж.д., кроме свершение или не свершение соответствующих исходных (иницирующих) событий (ИС) аварии x_1 - излом рельса и x_2 и возникновение предмета на рельсах. То есть, эти вершины СФЦ являются головными, поскольку в них не заходит ни одной дуги функционального подчинения.
2. Первым условием, реализации прямой выходной функции y_3 (горит красный сигнал светофора), является безотказная работа всего оборудования индикатора излома рельса x_3 . Вторым, обеспечивающим условием, является наличие (реализация) функции y_1 - возникновения излома рельса на данном участка ж.д.
3. Функция y_4 (включение тормозной системы поезда) непосредственно реализуется при безошибочной работе машиниста x_4 и обеспечивается хотя бы одним из двух условий: или горит красный сигнал светофора - y_3 (есть событие излома рельса), или возник предмет на рельсах - y_2 .
4. Поезд не выезжает на опасный участок железной дороги - y_5 , если тормозная система была своевременно включена машинистом - y_4 и не произошло собственного отказа тормозной системы поезда - x_5 .
5. Для целенаправленного анализа безопасности рассматриваемого участка ж.д. на рис. 2.7.6 с помощью фиктивных вершин 6 и 7 выполнены две группировки интегративных функций. Функция $y_6 = \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2$ определяет отсутствие всех исходных событий (нет излома и нет предмета) 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 ИС (исходных причин аварии), или y_5 - реализуется при условии возникновения хотя бы одного ИС и правильной (штатной)

работы элементов системы безопасности, т.е. иницирующих условий (ИУ) - индикатора излома рельса, машиниста и тормозной системы. Естественно, что полная инверсия этой функции безопасности (\bar{y}_7) должна соответствовать всем возможным вариантам событий, неизбежно приводящим к аварии на рассматриваемом участке железной дороги.

Теперь осталось только объединить все указанные на рис.2.19 фрагменты, и получаем законченную СФЦ структурной модели безопасности исследуемого участка железной дороги.

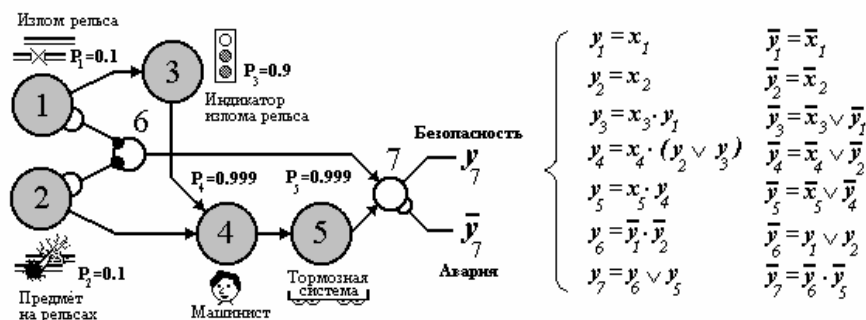


Рис. 2. 7.7. СФЦ безопасности железной дороги

4. Анализ корректности построения СФЦ

Важным завершающим этапом является анализ корректности (полноты, правильности) полученного на третьем этапе варианта СФЦ системы, ее соответствия целям моделирования, особенностям исследуемой системы, принятым ограничениям и допущениям. Это, безусловно, творческий, профессионально ориентированный и, часто, коллегиальный процесс. Однако в какой бы форме не выполнялась указанная работа, всегда могут иметь место следующие три варианта конечного результата.

1. СФЦ признается в достаточной степени корректной, т.е. ее можно использовать для дальнейшего построения расчетных математических моделей и исследования свойств НБР рассматриваемой системы. Тогда построение СФЦ завершается.
2. СФЦ признается недостаточно корректной, но ее можно усовершенствовать. Тогда осуществляется возврат к одному из предыдущих этапов вплоть до изменения исходной формулировки задачи моделирования.
3. СФЦ признается недостаточно корректной и никакое улучшение не позволяет решить поставленную задачу моделирования. Тогда приходится отказаться от применения ОЛВМ и технологии и ПК АСМ и искать какие-либо другие пути решения поставленной задачи. Полезно, однако, исследовать причины такого отказа. Их также можно разделить на три группы. Во-первых, это объективные причины принципиальной невозможности применения методов логико-вероятностного моделирования для решения поставленной задачи. Во-вторых, когда решение задачи логико-вероятностными методами в принципе возможно, но этого не позволяет сделать существующий уровень развития теории ОЛВМ или уровень реализованных в программных комплексах возможностей автоматизированного структурно-логического моделирования. В этом случае открываются перспективы дальнейшего развития данного методологического направления системного анализа. И, в-третьих, бывает, что не удастся построить СФЦ из-за недостаточной теоретической или практической подготовки пользователя. В этом случае полезно обратиться за помощью к более опытным специалистам.

В рассматриваемом примере будем полагать, что изображенная на рис.2.7.7 СФЦ является приемлемым сценарием безопасности и ее можно использовать для построения

расчетных математических моделей и выполнения расчетов характеристик безопасности, аварии и риска функционирования данного участка ж.д.

Построение СФЦ является основной, но не единственной составляющей первого этапа ОЛВМ – формализованной постановки задачи моделирования системы. После построения СФЦ необходимо сформулировать и представить в формализованном виде один или несколько логических критериев функционирования системы (ЛКФ). С помощью ЛКФ в обобщенном виде задается условие реализации системой в целом свойств ее надежности, безопасности или риска. В общем случае ЛКФ в ОЛВМ может задаваться с помощью произвольной логической функции, составленной из обозначений прямых и/или инверсных выходных интегративных функций y_i различных функциональных и фиктивных вершин СФЦ. Так, для решения поставленной в рассматриваемом примере задачи расчета вероятности не возникновения аварии, т.е. безопасности участка ж.д., могут быть заданы следующие виды логических критериев:

$$Y_{c1} = y_6 \vee y_5 = y_7 - \text{критерии безопасности участка ж.д.}$$

$$Y_{c2} = \bar{y}_6 \cdot \bar{y}_5 = \bar{y}_7 - \text{критерий возникновения аварии на участке ж.д.}$$

В процессе построения СФЦ, изображенной на рис. 2.7.7, главным было определение и графическое представление условий реализации элементами таких комбинаций выходных функций, которые во всех возможных случаях определяют безопасность рассматриваемого участка ж.д., то есть реализацию системой безопасности своего основного назначения. Такой подход или способ называют построением СФЦ на основе прямой логики рассуждений. Как правило, применение прямой логики рассуждений при построении СФЦ и других структурных моделей (блок-схем, деревьев событий, графов связности) работоспособности или безопасности систем бывает значительно легче, чем построение противоположных структурные модели отказа, аварий, неготовности и т.д. Это обусловлено тем, что специалисты, обычно, лучше знают, как должна правильно функционировать система, и хуже знают условия и комбинации состояний элементов, которые приводят к ее отказу или возникновению аварий. Поэтому применение обратной логики рассуждений при построении структурных моделей отказов или аварий систем, часто бывает затруднительным. Для систем большой размерности и высокой структурной сложности построить правильное дерево отказов часто бывает просто невозможно. Однако следует еще раз подчеркнуть, что логическая универсальность ОЛВМ позволяет реализовать с помощью СФЦ оба указанных подхода, т.е. одинаково корректно представлять как модели работоспособности и безопасности, так и модели их отказа, аварии и риска функционирования. Пользователь имеет возможность выбора прямой или обратной логики рассуждений при построении СФЦ. Это существенно расширяет область практического применения ОЛВМ и технологии АСМ в вероятностном анализе надежности и безопасности систем.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СФЦ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ ЛОГИКИ РАССУЖДЕНИЙ

В качестве примера использования обратной логики рассуждений разработаем с помощью аппарата СФЦ сценарий опасного состояния системы (ОСС), т.е. возникновения (аварии) на рассматриваемом участке ж.д. (см. рис.2.7.5). Для единообразия элементов моделей будем полагать, что состав бинарных событий остается прежним и представлен на рис.2.7.4.

Сначала рассмотрим типичный, для существующей концепции логико-вероятностной теории безопасности, вариант сценария ОСС представленного в виде монотонного дерева отказа. Оно изображено на рис.2.7.8.а.

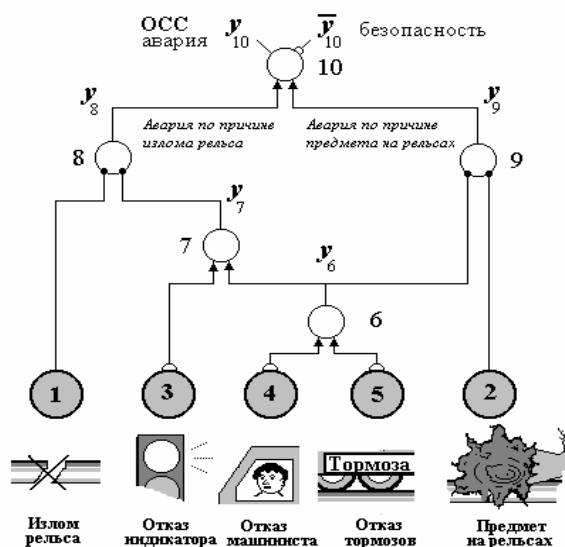


Рис 2.7.8.а. Монотонный вариант сценария ОСС (дерева отказа) участка ж.д.

Для построения дерева отказа данного сценария необходимо было мысленно перебрать все возможные комбинации исходных событий, приводящие к возникновению аварии на рассматриваемом участке ж.д.

На рис. 2.7.8.а. интегративная функция y_8 представляет все условия, когда авария происходит из-за возникновения излома рельса. Здесь наряду с исходным событием излома рельса x_1 обязательными дополнительными условиями являются или отказ индикатора \bar{x}_3 , или отказ машиниста \bar{x}_4 , или отказ тормозной системы \bar{x}_5 , или любая возможная совместная комбинация указанных событий. Функция y_9 представляет все условия, когда авария происходит при возникновении предмета на рельсах x_2 . В этом случае, индикатор излома не влияет на безопасность. Дополнительными условиями, приводящими к аварии, здесь являются только отказ машиниста \bar{x}_4 или/и отказ тормозной системы поезда \bar{x}_5 .

Если предположить, что все указанные варианты возникновения аварии функциями y_8 и y_9 представлены на рис.2.7.8.а правильно и полно, то ОСС (авария) участка ж.д. в целом будет представляться выходной интегративной функцией y_{10} , которая реализуется при возникновении хотя бы одной из функций или y_8 , или y_9 , или обеих вместе.

Однако, при реализации обратной логики рассуждений и построении средствами СФЦ дерева отказов, приведенного на рис. 2.7.8.а, была допущена одна, не сразу очевидная ошибка. В приведенных выше рассуждениях и схеме и на рис. 2.7.8.а оказалась неправильно учтена следующая комбинация исходных событий

$$x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5.$$

Согласно рис. 2.7.8.а, эта комбинация отнесена к ОСС, т.е. к аварии на рассматриваемом участке ж.д. Но это не так. Указанная комбинация исходных событий говорит, что, во-первых, произошел излом рельса (x_1), который машинист сам не может видеть. Во-вторых, отказал индикатор излома рельса (\bar{x}_3), т.е. продолжает гореть зеленый разрешающий сигнал светофора. В-третьих, есть опасный предмет на рельсах (x_2). В-четвертых, машинист увидел опасный предмет и своевременно включил тормозную систему (x_4). И в-пятых, тормозная система не отказала (x_5). Следовательно, аварии не произошло.

Здесь, опасность, вызванная отказом индикатора излома рельса, удачно компенсируется другой опасностью - возникновением предмета на рельсах, которая в данных условиях (высокая надежность машиниста и тормозной системы) оказывает не отрицательное, а положительное влияние на безопасность участка ж.д. В монотонной структурной схеме дерева отказов на рис. 2.7.8.а указанная немонотонная зависимость событий не учтена (пропущена). Подобные ситуации в монотонных структурах (блок-схемах и графах связности) вообще не могут быть учтены, поскольку эти графы полностью лишены возможности представления инверсий.

Исправить указанную ошибку структурного моделирования можно только используя в СФЦ дерева отказов дополнительные инверсные связи функционального подчинения. Вариант такой правильной схемы функциональной целостности, представляющей немонотонное дерево отказов сценария ОСС рассматриваемого участка ж.д., приведен на рис. 2.7.8.б.

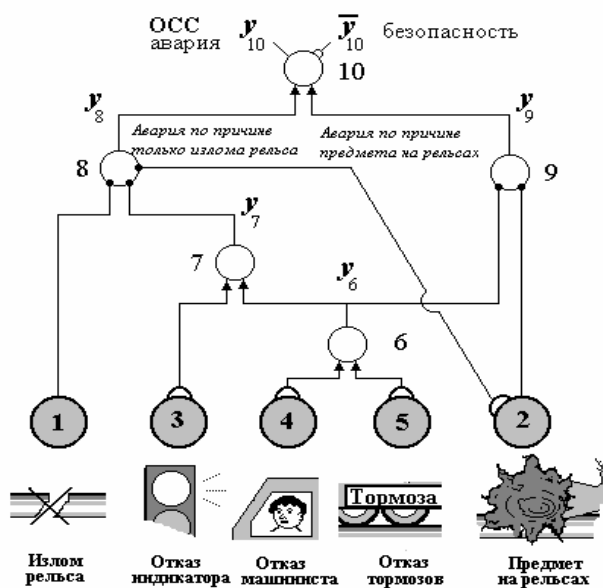


Рис. 2.7.8.б. Правильный вариант СФЦ дерева отказа (ОСС) участка ж.д.

На этой схеме, условие реализации функции y_8 (возникновение аварии вследствие излома рельса) дополнено еще одним обязательным условием \bar{y}_2 (отсутствие предмета на рельсах).

Разработать СФЦ сценария ОСС (рис. 2.7.8.б), даже в таком простом примере, оказалось сложнее, чем построить СФЦ сценария ее безопасного функционирования (рис.2.7.7).

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ НА ПК АСМ

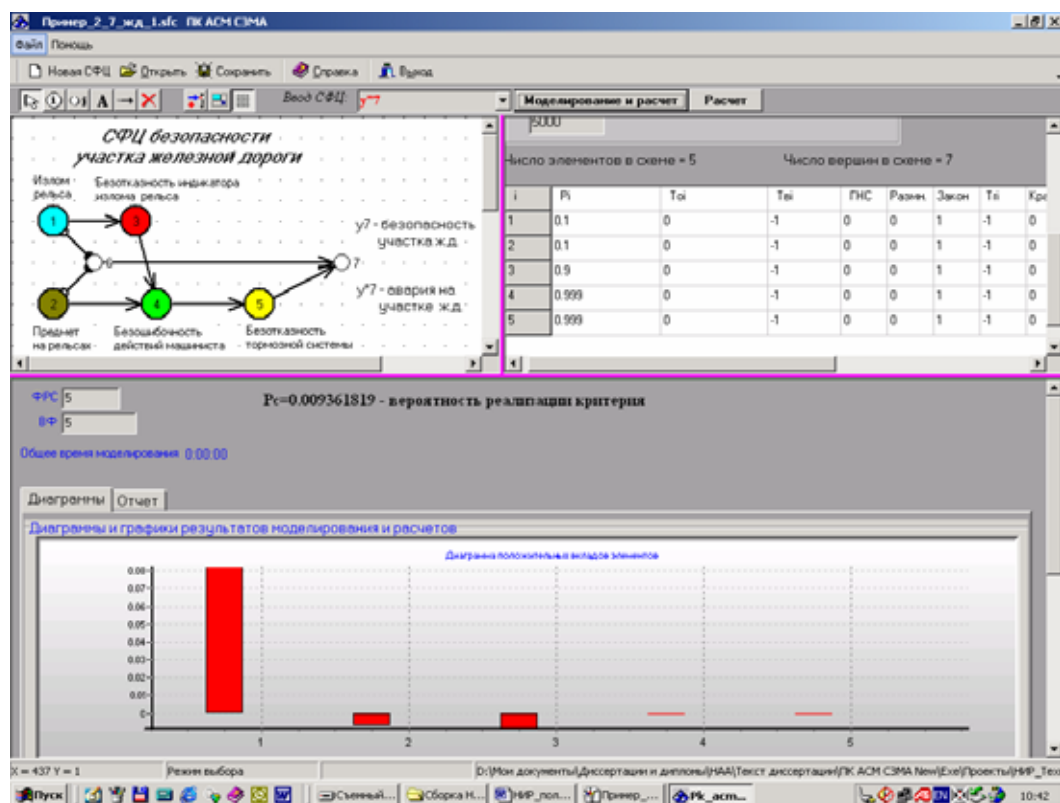
Общая методика использования всех версий ПК АСМ характеризуется следующей последовательностью действий.

1. Разработанная СФЦ с помощью графического редактора вводится в ПК АСМ. В ПК АСМ выполняется автоматическое преобразование графа СФЦ в соответствующую систему логических уравнений в функционально полном базисе логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ".
2. Вводятся значения вероятностных и других параметров элементов и режимов автоматизированного моделирования.

чения этого результата с помощью Relex Fault Tree было использовано дерево безопасности участка ж.д., приведенное на рис.2.7.2.

Из приведенной на рисунке 2.7.8 диаграммы положительных вкладов элементов следует, что наибольшую опасность представляет событие излома рельса, а увеличение вероятности возникновения предмета на рельсах не уменьшает, а увеличивает безопасности на данном участке ж.д.

2. На основе той же СФЦ, изображенной на рис.2.7.7, изменяя только ЛКФ $Y_C = y7$ (отсутствие аварии) на противоположный $Y_C = \bar{y}7 = y''7$ (возникновение аварии) ПК АСМ СЗМА выполняет моделирование и оценку вероятности возникновения аварии на рассматриваемом участке ж.д. Результаты приведены на рисунке 2.7.10.



Полученная вероятность возникновения аварии на рассматриваемом участке ж.д. составила $P_{\text{безопасности}} = 0.009361819$, что точно совпадает с результатом решения этой задачи, полученным с помощью модуля деревьев отказов Relex Fault Tree. Для получения этого результата с помощью Relex Fault Tree потребовалось построение другого дерева аварии участка ж.д., приведенного на рис. 2.7.3.

3. Выполним с помощью ПК АСМ СЗМА автоматизированное моделирование и расчет безопасности рассматриваемого участка ж.д. на основе СФЦ правильного дерева отказа, изображенной на рис. 2.7.8.б, задав ЛКФ $Y_C = y10$ (возникновение аварии). Результаты приведены на рисунке 2.7.11.

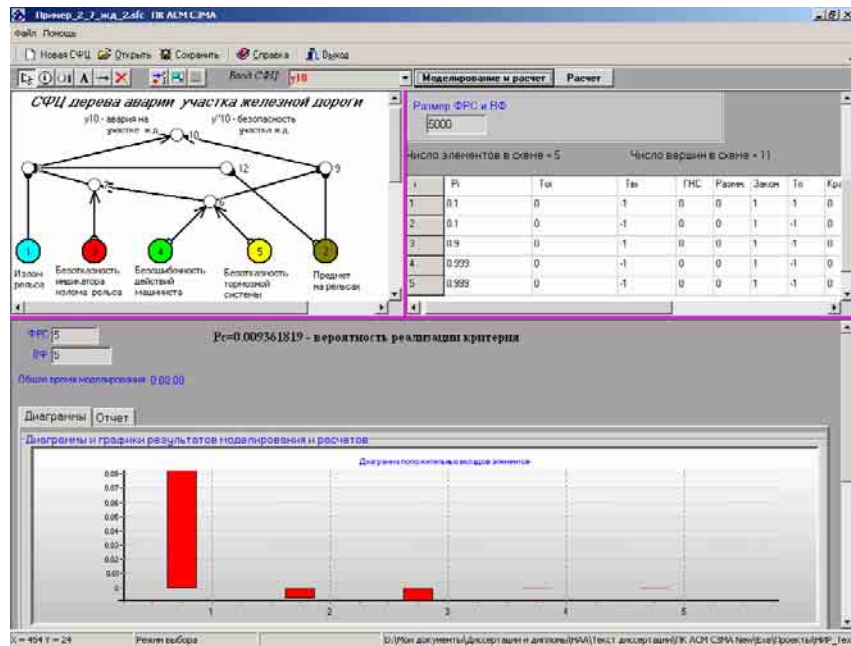


Рис. 2.7.11. Результаты расчетов на основе правильного дерева отказов

Полученная на основе СФЦ дерева аварии вероятность возникновения аварии на рассматриваемом участке ж.д. составила $P_{\text{безопасности}} = 0.009361819$, что точно совпадает с предыдущими результатами.

- На основе той же СФЦ дерева аварии, изображенной на рис. 27.8.б, изменяя только ЛКФ $Y_C = y10$ (возникновение аварии) на противоположный $Y_C = \bar{y}10 = y'10$ (отсутствия аварии) ПК АСМ СЗМА выполняет моделирование и оценку безопасности рассматриваемого участка ж.д.. Результаты приведены на рисунке 2.7.12.
-

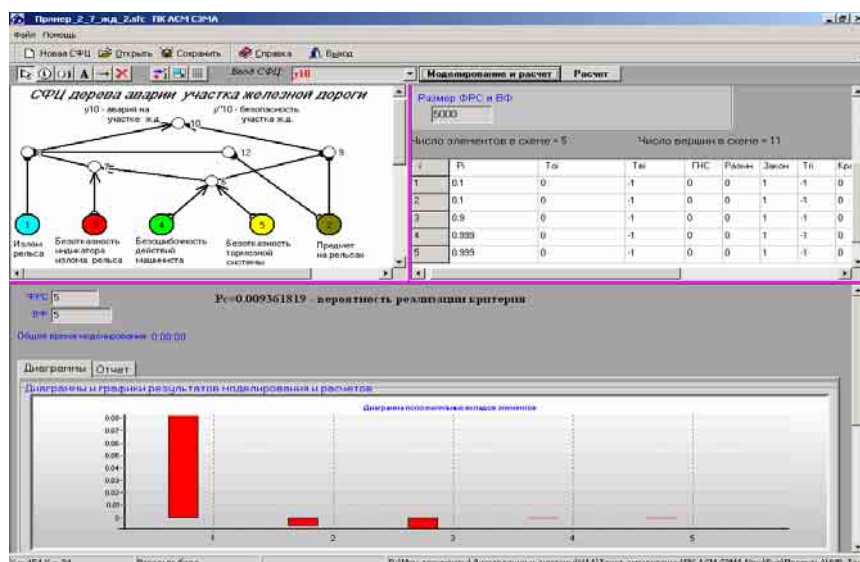


Рис. 2.7.12. Результаты расчета вероятности отсутствия аварии

Полученная на основе СФЦ дерева аварии вероятность не возникновения аварии (безопасности) на рассматриваемом участке ж.д. составила $P_{\text{безопасности}} = 0.009361819$, что точно совпадает с предыдущими результатами.

6. Выполним моделирование и расчет вероятности безопасности участка ж.д. на основе СФЦ, представляющей дерево безопасности Relex Fault Tree, изображенного на рис. 2.7.2. Результаты приведены на 2.7.13.

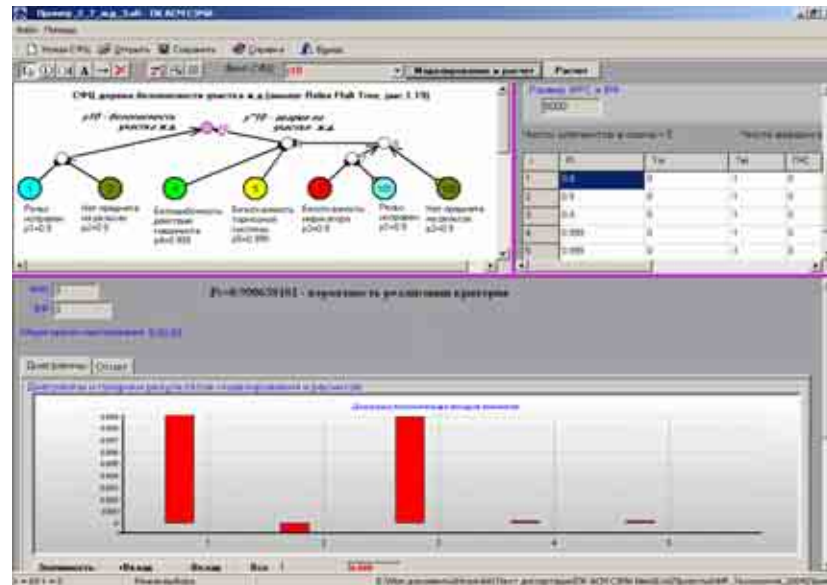


Рис. 2.7.13. Результаты расчетов на основе СФЦ дерева безопасности

7. Выполним моделирование и расчет вероятности аварии участка ж.д. на основе СФЦ, представляющей дерево аварии Relex Fault Tree, изображенного на рис. 2.7.3. Результаты приведены на рисунке 2.7.14.

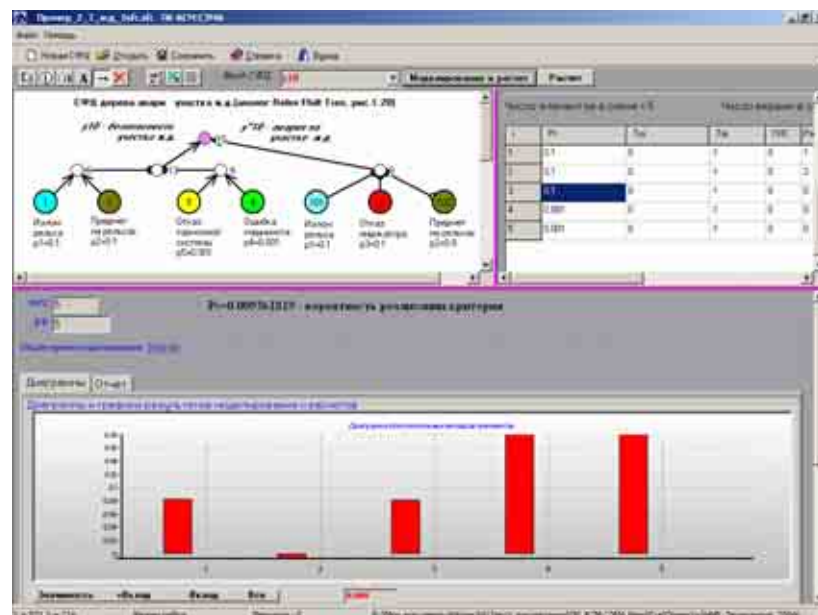


Рис. 2.7.14. Результаты расчетов вероятности аварии по дереву отказов, аналогичному дереву на рис. 2.7.2.

Эти расчеты совпали с ранее полученными результатами (как средствами технологии Relex, так и средствами технологии АСМ).

Рассмотренный пример позволяет заключить, что в методическом плане использование аппарата СФЦ технологии АСМ во многих случаях является более удобным и эффективным инструментом постановки задач автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности и безопасности систем большой размерности и высокой структурной сложности.

2.7.4. Результаты решения на ПК «RISK SPECTRUM»

На рис. 2.7.15 представлено дерево отказов для обратной задачи (крушение поезда произошло).

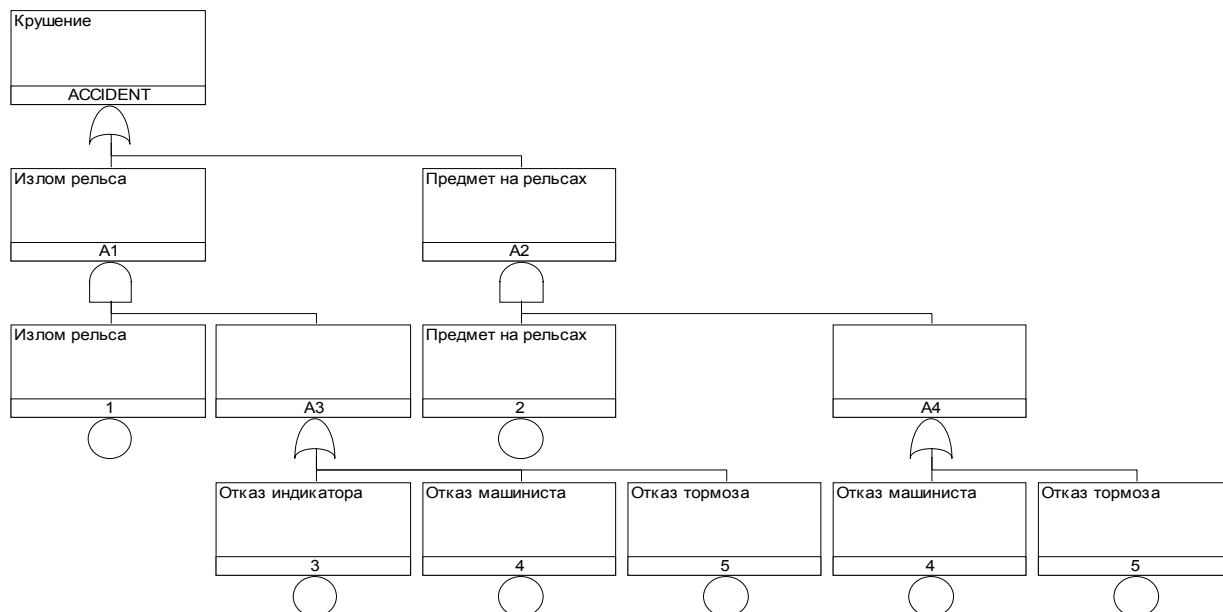


Рис. 2.7.15. Дерево отказов для аварии на участке ж.д.

Вероятности отказов базисных элементов приняты более высокими, чем в предыдущих примерах: $Q_i = 0.0001$.

При решении задачи с помощью ПК «Risk Spectrum» были получены следующие минимальные сечения отказов:

$$2 \cdot x 5 \vee 2 \cdot x 4 \vee 1 \cdot x 5 \vee 1 \cdot x 4 \vee 1 \cdot x 3$$

Рассчитанное значение вероятности свершения аварии равно $5 E-08$.

Для проверки результатов моделирования и расчета и их соответствия результатам, полученным с помощью других кодов были произведены расчеты с помощью ПК NEW-АСМ, в основе которого лежит та же технология, что и у кодов АСМ 2001 и АСМ СЗМА. Расчеты велись по СФЦ, представленной на рис. 2.7.7. Однако в данном случае были заданы более высокие показатели собственной надежности элементов системы, такие же, как при расчетах с помощью ПК «Risk Spectrum». При этом получены следующие результаты:

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПО СФЦ рис. 2.7.7:

Перечень событий в модели

Таблица 2.7.1.

№№ вершины СФЦ	Описание события	Вероятностная характеристика события
1	Рельс неисправен	0.000100
2	Предмет на рельсах	0.000100
3	Индикатор исправен	0.999900
4	Машинист действует правильно	0.999900
5	Тормоза исправны	0.999900

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в минимальной ДНФ)

Логический критерий: $Y_c = \neg x_7$ Размерность ЛФ $K_1=5$ Время построения - 0.00 сек. $Y_c = x_2 \cdot \neg x_4 \vee x_2 \cdot \neg x_5 \vee x_1 \cdot \neg x_2 \cdot \neg x_3 \vee x_1 \cdot \neg x_4 \vee x_1 \cdot \neg x_5$

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в ортогональной ДНФ)

Размерность ВФ $K_{10}=5$ Время построения - 0.00 сек. $P_c = p_1 \cdot q_4 + p_1 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_4 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность реализации критерия: 4.9993000400e-08

Вероятность не реализации критерия: 9.9999995001e-01

Таблица характеристик элементов системы

Таблица 2.7.2.

номер эл-та	параметр эл-та	значимость эл-та	вклад 0 <-- p	вклад p --> 1
1	0.000100	2.999400e-04	-2.999400e-08	2.999100e-04
2	0.000100	1.999600e-04	-1.999600e-08	1.999400e-04
3	0.999900	-9.997000e-05	9.996001e-05	-9.997000e-09
4	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08
5	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08

Как следует из представленных результатов, результаты решения не совпали с результатами, полученными А.С. Можаяевым. Причем не совпали не только результаты расчетов системной характеристики, но и полученные минимальные сечения отказов.

Для выяснения причин несовпадения результатов СФЦ была разработана СФЦ безопасности участка железной дороги, представленная на рис. 2.7.16. Эта СФЦ полностью аналогична инверсированному дереву отказов рис. 2.7.15

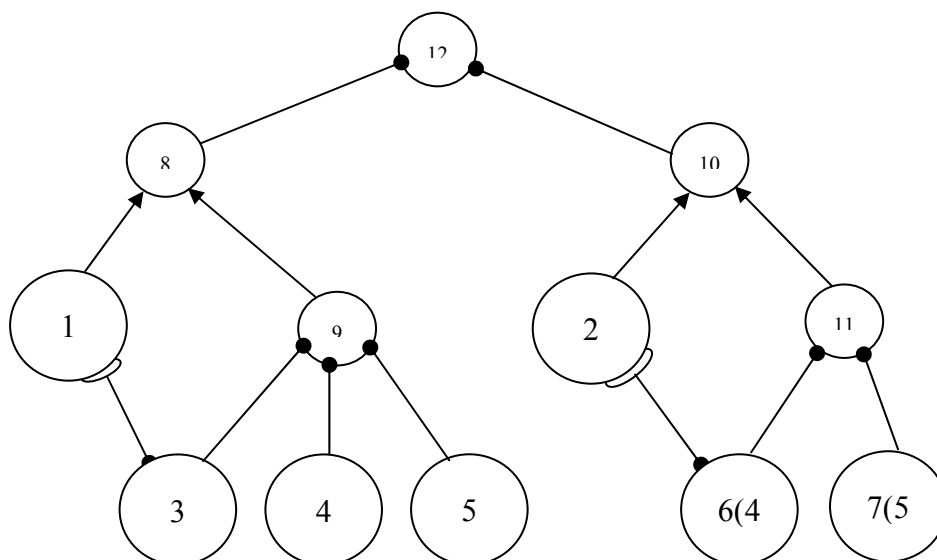


Рис. 2.7.16. СФЦ безопасности участка ж.д.

В таблице 2.7.1 приведено описание элементарных событий, включенных в СФЦ.

Перечень событий в модели

Таблица 2.7.3.

№№ вершины СФЦ	Описание события	Вероятностная характеристика события
1	Рельс исправен	0.999900
2	Предмета на рельсах нет	0.999900
3	Индикатор исправен	0.999900
4	Машинист действует правильно	0.999900
5	Тормоза исправны	0.999900

Как следует из таблицы 2.7.1, здесь допущены два непринципиальных отступления от постановки задачи, данной А.С. Можаявым:

- вместо события №1 в постановке А.С. Можаява «Излом рельса» использовано противоположное событие «Рельс исправен»;
- вместо события №2 в постановке А.С. Можаява «Предмет на рельсах» использовано противоположное событие «Предмета на рельсах нет».

События № 6 и № 7 – размноженные. Шестое соответствует четвертому, а седьмое – пятому.

Ниже приведены результаты решения обратной (произошло крушение поезда) и прямой (крушения не произошло) задач оценки безопасности участка ж.д., выполненного с помощью ПК NEWАСМ по СФЦ рис. 2.7.16.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПО СФЦ рис. 2.7.16:

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в минимальной ДНФ)

Логический критерий: $Y_c = \neg x_{12}$

Размерность ЛФ $K_1=5$ Время построения - 0.00 сек.

$Y_c = \neg x_2 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_2 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_3$

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в ортогональной ДНФ)

Размерность ВФ $K_{10}=5$ Время построения - 0.00 сек.

$P_c = q_1 * q_3 + q_1 * p_3 * q_4 + p_1 * q_2 * q_4 + q_1 * p_3 * p_4 * q_5 + p_1 * q_2 * p_4 * q_5$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность реализации критерия: 4.9994000200e-08

Вероятность не реализации критерия: 9.9999995001e-01

Таблица характеристик элементов системы

Таблица 2.7.4.

номер эл-та	параметр эл-та	значимость эл-та	вклад 0 <-- p	вклад p --> 1
1	0.999900	-2.999500e-04	2.999200e-04	-2.999500e-08
2	0.999900	-1.999700e-04	1.999500e-04	-1.999700e-08
3	0.999900	-9.998000e-05	9.997000e-05	-9.998000e-09
4	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08
5	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ПО СФЦ рис. 2.7.16:

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в минимальной ДНФ)

Логический критерий: $Y_c = x_{12}$ Размерность ЛФ $K_1=3$ Время построения - 0.00 сек. $Y_c = x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee \neg x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee x_1 \cdot x_2$

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в ортогональной ДНФ)

Размерность ВФ $K_{10}=3$ Время построения - 0.00 сек. $P_c = p_1 \cdot p_2 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность реализации критерия: 9.9999995001e-01

Вероятность не реализации критерия: 4.9994000162e-08

Таблица характеристик элементов системы

Таблица 2.7.5.

номер эл-та	параметр эл-та	значимость эл-та	вклад $0 \leftarrow p$	вклад $p \rightarrow 1$
1	0.999900	2.999500e-04	-2.999200e-04	2.999500e-08
2	0.999900	1.999700e-04	-1.999500e-04	1.999700e-08
3	0.999900	9.998000e-05	-9.997000e-05	9.998000e-09
4	0.999900	1.999600e-04	-1.999400e-04	1.999600e-08
5	0.999900	1.999600e-04	-1.999400e-04	1.999600e-08

Как следует из вышеизложенного, полученные результаты совпали с результатами расчетов по коду «Risk Spectrum» (для обратной задачи) и не совпали с результатами, полученными А.С. Можаяевым.

Из анализа МСО, полученных при решении обратной задачи по обеим СФЦ, было установлено следующее:

На основе СФЦ рис. 2.7.16 получены следующие сечения:

$$Y_c = \neg x_2 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_2 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_3$$

На основе СФЦ рис. 2.7.7 получены такие сечения:

$$Y_c = x_2 \cdot \neg x_4 \vee x_2 \cdot \neg x_5 \vee x_1 \cdot \neg x_2 \cdot \neg x_3 \vee x_1 \cdot \neg x_4 \vee x_1 \cdot \neg x_5$$

Если учесть, что в СФЦ рис. 2.7.16 и СФЦ рис. 2.7.7 события 1 и события 2 противоположны друг другу, то МСО, полученные по СФЦ рис. 2.7.7 переписутся следующим образом:

$$Y_c = \neg x_2 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_2 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_1 \cdot x_2 \cdot \neg x_3 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_5$$

Из последней записи хорошо видно, что в первой СФЦ не учтен тот факт, что событие «Предмет на рельсах» как бы «дублирует» сигнал индикатора. В этом случае машинист, не зная о поломке рельса (вследствие отказа индикатора), останавливает поезд по другому сигналу опасности – «Визуальный образ предмета на рельсах».

В связи с вышесказанным были разработаны две СФЦ, учитывающие данное обстоятельство. СФЦ, изображенная на рис. 2.7.17, подобна СФЦ рис. 2.7.7, но не включает в себя событий, связанных с отказами каких-то элементов, т.е. построена в более строгом соответствии с прямой логикой рассуждений. Для этого события 1 и 2 были заменены на противоположные (1 – рельс исправен, 2 – предмет на рельсах отсутствует). СФЦ, изо-

браженная на рис. 2.7.18, представляет собой откорректированный вариант СФЦ рис. 2.7.16.

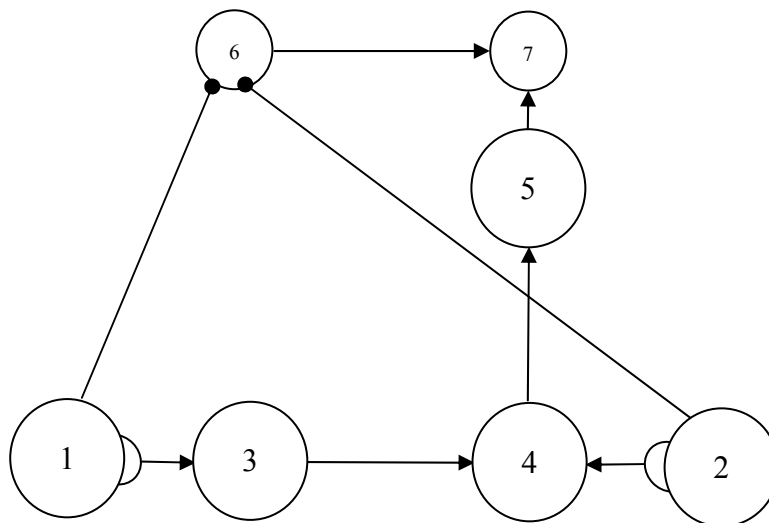


Рис. 2.7.17. СФЦ, построенная с учетом «дублирования» сигналов опасности.

1

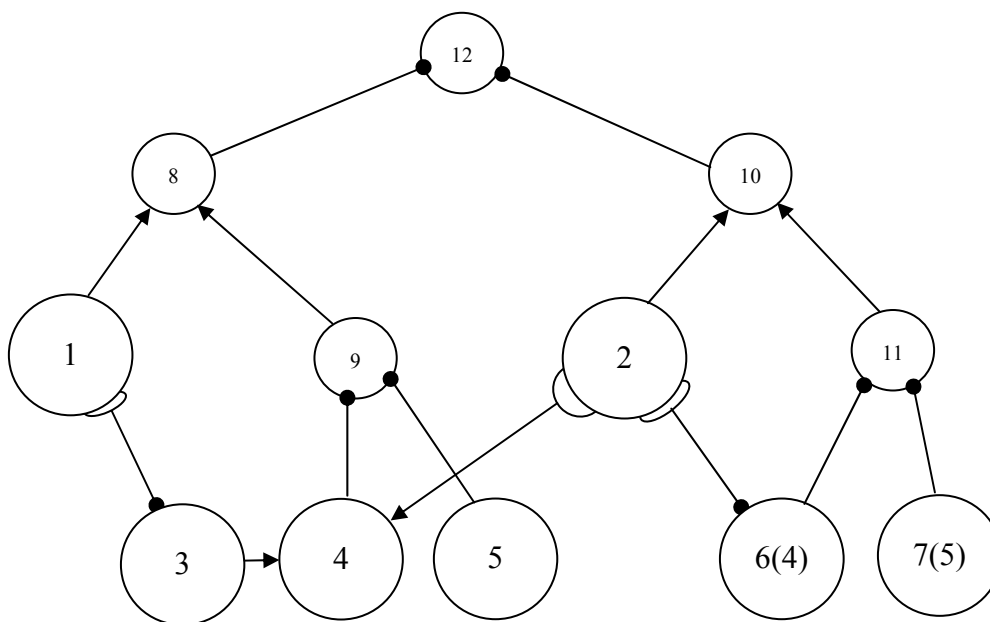


Рис. 2.7.18. СФЦ (рис. 2.7.16), откорректированная с учетом «дублирования» сигналов опасности.

Результаты расчетов по СФЦ 2.7.17 и 2.7.18 полностью совпадают. Ниже представлены результаты расчетов по СФЦ рис. 2.7.18.

ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в минимальной ДНФ)

Логический критерий: $Y_c = \neg x_{12}$

Размерность ЛФ $K_1=5$ Время построения - 0.00 сек.

$Y_c = \neg x_2 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_2 \cdot \neg x_4 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_5 \vee \neg x_1 \cdot x_2 \cdot \neg x_3 \vee \neg x_1 \cdot \neg x_4$

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

(в ортогональной ДНФ)

Размерность ВФ $K_{10}=5$ Время построения - 0.00 сек.

$P_c = q_1 \cdot q_4 + q_1 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_4 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Вероятность реализации критерия: $4.9993000400e-08$
 Вероятность не реализации критерия: $9.9999995001e-01$

Характеристики элементов системы.

Таблица 2.7.6.

номер эл-та	параметр эл-та	значимость эл-та	вклад $0 \leftarrow p$	вклад $p \rightarrow 1$
1	0.999900	-2.999400e-04	2.999100e-04	-2.999400e-08
2	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08
3	0.999900	-9.997000e-05	9.996001e-05	-9.997000e-09
4	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08
5	0.999900	-1.999600e-04	1.999400e-04	-1.999600e-08

Как следует из новых результатов расчета, они полностью совпали с результатами, полученными А.С. Можаяевым.

В соответствии с полученными выводами дерево отказов, рис. 2.7.15 было откорректировано в целях учета дублирования сигналов опасности при одновременном возникновении обоих ИС. Новое дерево представлено на рисунке 2.7.19.

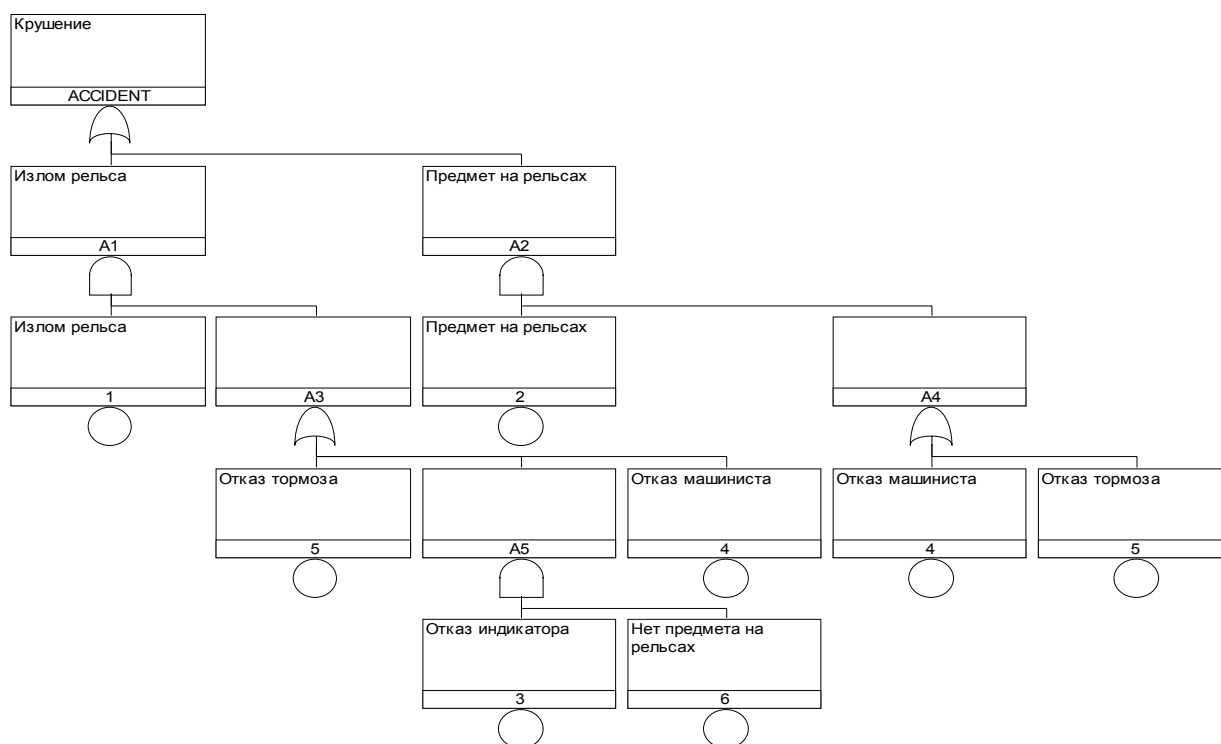


Рис. 2.7.19. Дерево отказов, учитывающее дублирование информации об опасности

Как следует из рис. 2.7.19, дублирование информации учтено введением в дерево отказов нового базисного события №6 «Нет предмета на рельсах». Данному событию была задана вероятность $q_6 = 0.9999$.

Результаты расчетов по дереву рис. 2.7.19 представлены на рис. 2.7.20, полученном путем копирования рабочего окна кода «Risk Spectrum».

Как следует из рис. 2.7.20, результаты расчетов по откорректированному дереву практически совпали с результатами, полученными с помощью других кодов. Совпали

также и все минимальные сечения отказов (с учетом изменения нумерации нового базисного события (№6), введенного в ДО).

В таблице 2.7.7 приведены результаты расчета относительной важности элементов системы.

Таблица 2.7.7.

№№	FV	FC	RDF	RIF	Sens	Sens high	Sens low
1	6.00E-01	6.00E-01	2.50E+00	6.00E+03	1.39E+01	3.20E-07	2.30E-08
2	4.00E-01	4.00E-01	1.67E+00	4.00E+03	7.19E+00	2.30E-07	3.20E-08
5	4.00E-01	4.00E-01	1.67E+00	4.00E+03	7.19E+00	2.30E-07	3.20E-08
4	4.00E-01	4.00E-01	1.67E+00	4.00E+03	7.19E+00	2.30E-07	3.20E-08
6	2.00E-01	2.00E-01	1.25E+00	1.00E+00	1.22E+00	5.00E-08	4.10E-08
3	2.00E-01	2.00E-01	1.25E+00	2.00E+03	3.41E+00	1.40E-07	4.10E-08

Как следует из табл. 2.7.7, относительная важность элементов, рассчитанная с помощью кода «Risk Spectrum», в основном совпадает с результатами, полученными с помощью ПК NEWАСМ. Однако, как и следовало ожидать, из-за введения в дерево нового базисного элемента изменилась значимость (по Веселы-Фасселу) элемента №3. Имеет значимость и сам элемент №6. Т.о. мы имеем некоторое искажение информации об относительной важности элементов.

Затем с помощью кода «Risk Spectrum» была решена прямая задача, т.е. рассчитана вероятность отсутствия аварии. Для этого дерево рис. 2.7.19 было инверсировано, а все базисные события, входящие в него, заменены на противоположные с соответствующим «инверсированием» собственных вероятностных характеристик. Инверсированное дерево «успеха» представлено на рис. 2.7.21.

После выполнения расчетов были получены следующие результаты:

Минимальные сечения: 1-4-5; 3-4-5; 1-6; 2-4-5

Значение системной характеристики (вероятности отсутствия аварии) при использовании первого порядка аппроксимации составило, 0,998, а при использовании третьего порядка аппроксимации - 0,9906. Т.о. результаты решения прямой задачи практически совпали с результатами, полученными с помощью других кодов.

ID	Description	Calc.type	Mean	5th perc.	Median	95th perc.
ACCIDENT	Крушение	Q	5,00E-08			

op event probability Q = 5,000E-08							
No.	Prob.	%	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	
1	1,000E-08	20,00	1	5			
2	1,000E-08	20,00	1	4			
3	1,000E-08	20,00	2	5			
4	1,000E-08	20,00	2	4			
5	9,999E-09	20,00	1	3	6		

Рис. 2.7.20. Результаты решения обратной задачи при оценке безопасности ж.д.

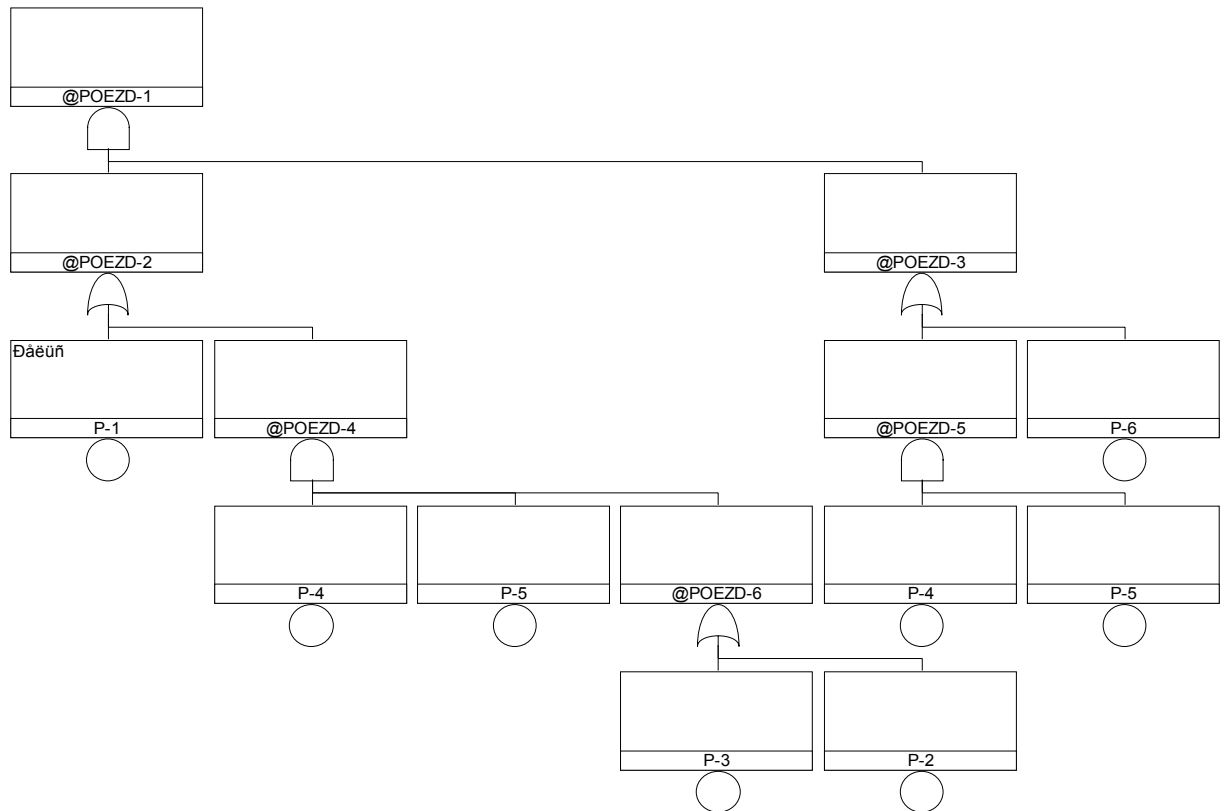


Рис. 2.7.21. Дерево «успеха» для прямой задачи по оценке безопасности ж.д.

Сводная таблица результатов раздела 2.7. " Расчет безопасности участка железной дороги "				
Параметры элементов	Характеристики задачи	Результаты моделирования и расчетов		
		Relex Fault Tree	ПК АСМ	Risk Spectrum
1	2	3	4	5
P1=0.9; P2= 0.9; P4= 0.999; P5= 0.999; P3= 0.9.	Моделирование и расчет вероятности отсутствия аварии	0.990638	0.99063818	0.9906
	Моделирование и расчет вероятности возникновения аварии	0.009362	0.00936182	
Моделирование и расчет вероятности возникновения аварии при p1 =0.0001 p2 =0.0001 p3 =0.9999 p4 =0.9999 p5 =0.9999		5.0e-8	5 E-08	5 E-08

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.7

Выводы специалистов ИПУ РАН

Пример данного раздела проверяет возможности разнообразного моделирования одной немонотонной задачи. Все программные комплексы успешно справились с данной задачей. Правда, на ПК Risk Spectrum решение получено некоторым «ручным» приемом. А на ПК Relex пока такая возможность имеется только в деревьях отказов, успехов (см. выводы ИПУ РАН по разделу 2.1).

Выводы специалистов ОАО "СПИК СЗМА"

1. Решения данной задачи, приведенное специалистами ИПУ РАН, убедительно подтверждает, что модуль Relex Fault Tree позволяет корректно решать немонотонные задачи логико-вероятностного моделирования, представляемые соответствующими деревьями отказов (см. рис.2.7.2 и рис.2.7.3). Это первое известное нам решение немонотонной задачи, полученное вне технологии и ПК АСМ. Результаты расчетов вероятностей отсутствия и возникновения аварии, полученные с помощью ПК АСМ и с помощью модуля Relex Fault Tree полностью совпали. Хотелось бы сравнить и оценки значимостей и вкладов элементов, но эти данные в результатах расчетов модулем Relex Fault Tree пока отсутствуют. Поскольку решения этой задачи с помощью модуля блок-схем Relex RBD не приведено, неясно, реализована ли возможность немонотонного моделирования блок-схем в этом программном модуле.
2. Мы повторили на ПК АСМ все способы моделирования и расчета данной задачи, которые были использованы специалистами СПБАЭП. Основные результаты совпали. Вместе с тем, мы не можем согласиться с заключением СПБАЭП о возможности решения немонотонных задач с помощью ПК Risk Spectrum. Приведенное ими решение, по нашему мнению, является не машинным, а изящным ручным приведением данной частной немонотонной задачи к монотонной структурной схеме (дереву отказов на рис.2.7.19 и дереву "успеха" на рис.2.7.21). Полагаем, что для более сложных задач такая методика малопригодна. В качестве иллюстрации мож-

но предложить специалистам СПБАЭП попытаться повторить с помощью их методики решение немонотонной задачи, приведенной в Примере 8 раздела 2.1.

3. В ходе исследования нам удалось представить с помощью СФЦ и решить методами и средствами технологии и ПК АСМ все приведенные в данном разделе варианты постановки рассматриваемой задачи. Это еще раз подтвердило высокую логическую универсальность аппарата СФЦ, ОЛВМ, технологии и ПК АСМ, разрабатываемых специалистами ОАО "СПИК СЗМА".

Выводы специалистов СПБАЭП

1. Все три программных комплекса могут решать задачи рассматриваемого класса.
2. ПК АСМ обеспечивает расчет, как вероятности успеха, так и вероятности аварии по одной и той же модели (СФЦ). При использовании других ПК (Relex и Risk Spectrum) для решения прямой и обратной задачи требуется разработка специальных деревьев отказов.
3. Использование прямой логики рассуждений в отдельных случаях позволяет как бы «автоматически» учесть особенности проявления и развития аварийных ситуаций, что обеспечивает получение более адекватных результатов, чем с помощью других методов и кодов.
4. В отличие от кодов АСМ и Relex, код Risk Spectrum не обеспечивает реализацию булевой операции отрицания (в этом коде использование соответствующего оператора равносильно заданию логического нуля (**0 - Ложь**) для соответствующей ветви дерева или базисного события), что затрудняет моделирование сложных условий подключения резерва, ветвление процессов и т.п.