

Д.т.н. В.М. Комяк, к.т.н. Ю.В. Уваров

ПОСТРОЕНИЕ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ И СЕМЕЙСТВА РЕШЕНИЙ КАК ЭЛЕМЕНТ ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Даны основы методики построения дерева отказов и получения семейства решений задач связанных с определением риска возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера.

Постановка проблемы. Рассматривая опасности технологического характера, отметим, что в своем большинстве риск связан с бесконтрольным освобождением энергии или утечками опасных веществ (радиационных, токсических пожаровзрывоопасных). Обычно одни отделения предприятия представляют большую опасность, чем другие, поэтому в самом начале следует провести разносторонний анализ и разбить предприятие (систему) на подсистемы, для того чтобы выявить такие участки производства или его компоненты, которые являются вероятными источниками бесконтрольных утечек (опасностей). Следовательно, первыми двумя шагами являются:

Шаг 1. Выявить источники опасности (возможны ли утечки ядовитых веществ, взрывы, пожары и т.д.).

Шаг 2. Определить части системы, которые могут вызывать эти опасные состояния (химические реакторы, емкости и хранилища, энергетические установки и др.).

Анализ последних достижений и публикаций. В настоящее время проблеме построения универсальных методик прогнозирования риска чрезвычайных событий уделяется пристальное, всевозрастающее внимание [1-6]. В тоже время предложенные в данной статье подходы, являются новыми именно в преломлении к задачам оценки риска чрезвычайных ситуаций.

Постановка задачи и ее решение. В ходе проведения мониторинга подсистем, которые могут вызвать опасные состояния полезно составлять список ключевых выражений и использовать следующие ключевые слова и выражения, для того чтобы обнаружить тенденции в изменениях:

Больше чем	Чем другие
Меньше чем	Так же как
Ни один из	Наоборот
Часть из	Позже чем
	Скорее чем

Средствами к достижению понимания опасностей в системе являются инженерный анализ и детальное рассмотрение окружающей среды, процесса работы и самого оборудования. При этом очень важно знание степени токсичности, правил безопасности, взрывоопасных условий, прохождения реакций, коррозионных процессов и условий возгораемости.

Обычно необходимы определенные ограничения на анализ технических систем и окружающей среды. Например, нерационально в деталях изучать параметры риска, связанного с разрушением ректификационной колонны нефтеперегонного завода из-за столкновения самолета с ней. Однако авиационные катастрофы, сейсмические воздействия и другие маловероятные типы опасностей действительно необходимо принимать во внимание при анализе риска, относящегося к атомной электростанции, потому что важно предусмотреть защиту от этого типа опасностей; теоретически атомная электростанция может вызвать больше жертв, чем ректификационная колонна. Поэтому необходим следующий шаг.

Шаг 3. Следует ввести ограничения на анализ. Например, нужно решить, будет ли он включать детальное изучение риска в результате саботажа, диверсий, войны, ошибок людей, поражения молнией, землетрясений и т. д.

Целью стадии I анализа риска является определение системы и выявление в общих чертах потенциальных опасностей.

Нередко стадия I анализа включает не только предварительное выявление элементов системы или событий, которые ведут к опасным ситуациям. Если задачи анализа расширяются с использованием более формализованных (количественных) приемов, в том числе с включением в рассмотрение последовательности событий, превращающих опасность в происшествие, а также корректирующих мероприятий для устранения последствий происшествия, то такая процедура называется предварительным анализом опасностей.

В аэрокосмической промышленности, например, опасности, после того как они выявлены, характеризуются в соответствии с вызываемыми ими последствиями.

Обычная схема классификации опасностей следующая.

Класс I — пренебрежимые эффекты.

Класс II — граничные эффекты.

Класс III — критические ситуации.

Класс IV — катастрофические последствия.

На следующей ступени необходимо наметить предупредительные меры (если эти меры вообще могут быть приняты), с тем чтобы исключить аварии класса IV и, по возможности, классов III и II.

Возможные решения, которые следует рассмотреть, показаны на рис. 3.5 в виде дерева решений. После этого можно принять необ-

ходимые решения по внесению исправлений в проект в целом или изменить конструкцию оборудования, изменить цели и функции и (или) внести нештатные действия с использованием предохранительных и предупреждающих устройств, противопожарных перегородок и т. п.

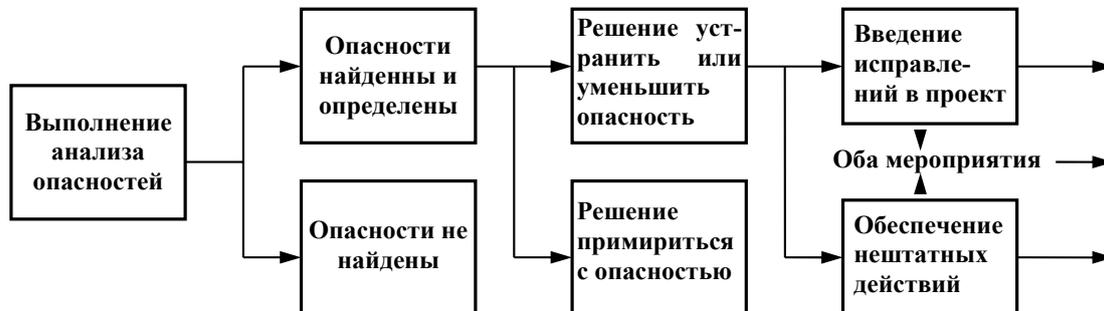


Рис. 1 – Дерево решений для анализа опасностей

Особое значение при выполнении анализа опасности имеют граничные условия для оборудования и подсистем. Как пример, описывается классический случай, который произошел на ранней стадии разработки баллистических ракет в США.

Четыре основные аварии произошли в результате многочисленных проблем сопряжения блоков. В результате каждой аварии были уничтожены как сами ракеты, так и шахтные стартовые комплексы стоимостью несколько миллионов долларов.

Отказ на космическом корабле «Аполлон-13» произошел из-за трудно контролируемого нарушения условий сопряжения. Во время предстартовой подготовки к термopереключателю нагревателя кислородного бака № 2 было приложено нерасчетное электрическое напряжение. Это вызвало разрушение изоляции проводов, ведущих к вентилятору внутри бака. Во время полета переключатель вентилятора был включен, произошло короткое замыкание, которое вызвало загорание тефлоновой изоляции, приведшее к взрыву кислородного бака.

Стоит отметить, что если нет специальных государственных декретов, директивных документов, предписывающих использование определенных процедур, практика и терминология, используемая в промышленности и относящаяся к стадии I, варьируются к широким пределам. В целом мониторинг и предварительный анализ представляет собой первую попытку выявить техническую или природную системы, отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Детальный анализ возможных событий обычно проводится с помощью дерева отказов (событий), после того как система полностью определена.

Стадия 2 анализа обычно начинается после того, как выбрана и определена конфигурация системы. Два общепринятых аналитических метода, созданных на основе дерева событий и дерева отказов. Другие используемые методики, основаны на анализе видов отказов и вызываемых последствий, а также на анализе критичности.



Рис. 2 – Пример решения задачи анализа безопасности техногенного объекта (реактора)

Рассмотрим в качестве примера изучение безопасности реактора. На стадии I было определено, что преобладающий риск связан с радиоактивными (токсичными) утечками. Стадия 2, как показано на рис. 2, начинается с рассмотрения первой задачи – определения последовательности развития аварии. На стадии 1 было выявлено, что критической частью реактора, т. е. подсистемой, с которой начинается риск, является система охлаждения реактора; таким образом, анализ риска начинается с прослеживания последовательности возможных событий с момента разрушения трубопровода холодильной установки, называемого иницирующим событием.

В отчете с помощью «обратной логики», и метода дерева отказов, получено численное значение вероятности P_A .

С помощью этой методики, отыскивается элемент оборудования или ошибка человека, которые могут привести к «конечному событию» — потере теплоносителя. Интенсивности отказов, полученные на основе экспериментальных данных по элементам, ошибкам человека, с использованием данных по испытаниям и профилактике системы, объединяются должным образом с помощью метода дерева отказов, для того чтобы определить коэффициент простоя и ненадежность технических систем. Эта процедура на рис. 2 выделена в виде задачи 2.

Теперь вернемся к блоку 1, рассмотрев дерево событий при аварии с потерей теплоносителя (АПТ) на типичной атомной электростанции. Авария начинается с разрушения трубопровода, имеющего вероятность возникновения P_A . Далее анализируем возможные варианты развития событий, которые могут последовать за разрушением трубопровода. В верхней части дерева исходных событий, отобража-

ются веса возможных альтернатив. На первой ветви рассматриваем состояние электрического питания. Если питание есть, следующей по структуре подвергаем анализу аварийную систему охлаждения активной зоны реактора. Отказ приводит к расплавлению топлива и к различным, в зависимости от степени целостности конструкции, утечкам радиоактивных продуктов.

Для анализа с использованием двоичной системы, в которой элементы либо выполняют свои функции, либо отказывают, число потенциальных отказов равно 2^{N-1} , где N — число рассматриваемых элементов. На практике, как показано ниже, исходное дерево отказов можно упростить с помощью обычной инженерной логики и свести к более простому дереву

В первую очередь представляет интерес вопрос о наличии электрического питания. Вопрос заключается в том, какова вероятность P_B отказа электропитания и какое действие этот отказ оказывает на другие системы защиты. Если нет электрического питания, фактически никакие действия, предусмотренные на случай аварии с использованием насосов для охлаждения активной зоны реактора и распылители, не могут производиться. В результате, упрощенное дерево событий не содержит выбора в случае отсутствия электрического питания, и может произойти очень большая авария, вероятность которой равна $P_A \times P_B$. В случае, если отказ в подаче электрической энергии зависит от поломки трубопровода системы охлаждения реактора, вероятность P_B следует подсчитывать как условную вероятность для учета этой зависимости. Очень важно уяснить, что дерево событий используется для определения последовательности событий при аварии, включающей сложные взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности. При его построении используется прямая логика. Вероятность P_B определяется с использованием обратной логики. При этом строится дерево отказов для подсистемы электропитания. Прямая логика, например та, что использовалась для построения дерева событий, а также для определения видов отказов при анализе последствий, часто называется индуктивной логикой; в то же время логика, используемая при анализе с помощью дерева отказов, называется дедуктивной. При выполнении ПАО используется как индуктивная, так дедуктивная логика.

Если электрическое питание имеется, следующие варианты при анализе зависят от состояния аварийной системы охлаждения активной зоны. Она может работать или не работать, и ее отказ с вероятностью P_{C1} ведет к последовательности событий. Следует обратить внимание на то, что по-прежнему имеются различные варианты развития аварии. Если система удаления радиоактивных материалов работоспособна, радиоактивные утечки меньше, чем в случае ее отказа. Конечно, отказ в общем случае ведет к последовательности событий с меньшей вероятностью, чем в случае работоспособности.

Рассмотрев все варианты дерева отказов, можно получить весь спектр величин возможных утечек и соответствующие вероятности для различных последовательностей развития аварии. Верхняя линия дерева является основным вариантом АПТ, который подвергается анализу в процессе официальной инспекции и приемки каждого реактора. При данной последовательности предполагается, что трубопровод разрушается, а все системы обеспечения безопасности сохраняют работоспособность.

Дерево решений является особой разновидностью дерева событий. В дереве событий рабочие состояния системы не рассматриваются, так что сумма вероятностей всех событий не равна единице. В дереве решений все возможные состояния системы необходимо выразить через состояния элементов. Таким образом, все состояния системы взаимно увязаны, и их вероятность в сумме должна равняться единице. Деревья решений могут использоваться, если отказы всех элементов независимы или если имеются элементы с несколькими возможными состояниями, а также есть односторонние зависимости. Они не могут использоваться при наличии двусторонних зависимостей и не обеспечивают проведения логического анализа при выборе начальных событий.

Анализ видов отказов и последствий является анализом индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последовательного рассмотрения одного элемента за другим анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляются их результирующие воздействия на систему. Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов выявляются и анализируются, для того чтобы определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом.

Эти приемы используются при выборочном методе анализа отказов. АВОП может быть существенно более детальным, чем анализ с помощью дерева отказов, так как при этом необходимо рассмотреть все возможные виды отказов или аварийные ситуации для каждого элемента системы. Например, реле может отказать по следующим причинам: контакты не разомкнулись; запаздывание в размыкании контактов; контакты не замкнулись; запаздывание в замыкании контактов; короткое замыкание контактов на корпус, источник питания, между контактами и в цепях управления; дребезжание контактов, неустойчивый электрический контакт; контактная дуга, генерирование помех; разрыв обмотки, короткое замыкание обмотки; низкое или высокое сопротивление обмотки; перегрев обмотки; короткое замыкание в цепях питания, управления и контактной группы или на корпус; чрезмерное намагничивание или гистерезис (тот же эффект, что при залипании контактов или запаздывании отпускания).

Дополнительно для каждой категории оборудования должен быть составлен перечень необходимых проверок. Например, для ба-

ков, других емкостей и секций трубопроводов такой перечень может включать следующее.

Переменные параметры: расход, количество, температура, давление, рН, насыщение и т. д.

Системы: нагрева, охлаждения, электропитания, подачи воды, воздуха и азота, управления и т. д.

Особые состояния: обслуживание, включение в работу, выключение, смена катализатора и т. д.

Изменения условий или состояния. Слишком большие, слишком малые, нет больше, гидроудар, несмешиваемость, осадок, дрейф, вибрация, пульсация, пожар, падение, механическое повреждение, коррозия, разрыв, утечка, взрыв, износ, открытие оператором, переполнение жидкостью.

Прибор: чувствительность, настройка, запаздывание.

Критичность устанавливается несколькими способами, в том числе при разных целях анализа, как это было проиллюстрировано выше, описывающем степени критичности различных опасностей в системе.

Так, например, методика, рекомендованная для аэрокосмической техники, определяет категории критичности для различных видов отказов элементов:

Категория 1: Отказ, потенциально приводящий к жертвам.

Категория 2: Отказ, потенциально приводящий к невыполнению основной задачи.

Категория 3: Отказ, приводящий к задержкам или потере работоспособности.

Категория 4: Отказ, приводящий к дополнительному, незапланированному обслуживанию.

Введение категорий критичности является очевидным «следующим шагом» после проведения АВОП. АВОП/АК — анализ видов отказов, их последствий и критичности. Элементы можно классифицировать, вычислив коэффициенты критичности C_r :

$$C_r = S_{i=1}^N baK_E K_A L_G t 10^6, n=1,2,\dots,N$$

где C_r — коэффициент критичности для элементов системы в потерях на миллион попыток; n — число критичных видов отказов элемента системы, которые попадают под конкретное определение потерь; N — суммарное число критических видов отказов элементов системы, соответствующих данному определению потерь; L_G — соответствующая частота отказов элементов системы, выраженная в отказах за час или цикл работы; t — время работы в часах или число рабочих циклов данного элемента при выполнении программы; K_A — коэффициент, учитывающий разницу между загрузкой элемента при определении параметра L_G и ожидаемой загрузкой элемента в данной

системе; K_E — коэффициент окружающих условий, учитывающий разницу между окружающими условиями при замере параметра L_G и ожидаемыми условиями работы элемента.

При упрощенном вычислении следует пренебрегать коэффициентами K_E и K_A , а значение L_G использовать в качестве приближенного значения интенсивности отказов для данного вида отказа и условий работы.

a — коэффициент отношения данного вида отказа к критическому. Этот коэффициент для данного вида отказа есть доля от L_G , вносимая этим отказом в критическое состояние системы; b — условная вероятность того, что последствия отказа для данного вида критического отказа имеют место при условии, что произошел критический отказ данного вида. Значение b следует выбирать из следующего набора величин:

Последствия отказа	Типичные значения Р, %
Фактические потери	100
Вероятные потери	10-100
Возможные потери	0-10
Отсутствие потерь	0

10^6 — множитель, переводящий коэффициент C_r от потерь на попытку к потерям на 1 млн. попыток. Таким образом, C_r обычно больше единицы.

Следует заметить, что данный метод разграничения не дает количественной оценки возможных последствий или ущерба. Основная его ценность заключается в улучшении качества системы путем определения:

Какой из элементов должен быть подвергнут детальному анализу с целью исключения опасностей, приводящих к возникновению аварии, т. е. с целью создания безотказной конструкции, снижения интенсивности отказов или ограничения ущерба?

Какой элемент или узел требует особого внимания в процессе производства, более жесткого контроля качества и нуждается в особо осторожном обращении в течение всего времени использования?

Каковы специальные требования для поставщиков, подлежащие включению в перечень характеристик, которые относятся к конструкции, функционированию, надежности, безопасности или гарантии качества?

Каковы нормативы входного контроля, которые должны быть установлены для элементов, получаемых от субподрядчиков, и для параметров, подлежащих наиболее тщательной проверке?

Где следует вводить специальные процедуры, правила безопасности, применять защитное оборудование, контрольные приборы или сигнальные системы?

Где можно наиболее эффективно затратить усилия и использовать средства для предотвращения аварии? Это является наиболее важным, так как на каждую программу обычно выделяются ограниченные средства.

Диаграммы причин — последствий были впервые предложены в Дании в лабораториях RISO. Их составление начинается с выбора критического события. Критические события выбирают таким образом, чтобы они служили удобными отправными точками для анализа, причем большинство аварийных ситуаций развивается за критическим событием в виде цепи отдельных событий.

Типичными критическими событиями, ведущими к аварийным ситуациям, могут быть возмущения основных параметров технологического процесса в баках или контейнерах; расширение диапазона давления или степени загрязнений; начало процесса выпуска партии продукции или начало процедуры пуска или остановки; событие, которое приводит в действие систему обеспечения безопасности.

«Выявление последствий», являющееся частью анализа «причин—последствий», начинается с выбора первичного события с последующим рассмотрением всей цепи вызываемых в системе событий. На различных ступенях цепи могут разветвляться и развиваться по двум направлениям в зависимости от различных условий. Например, начало пожара может привести к двум цепям событий: постепенному уничтожению всего предприятия или включению пожарной сигнализации с вызовом пожарной команды. Цепь событий может принять различные взаимоисключающие формы в зависимости от изменяющихся условий. Например, распространение пожара может зависеть от того, произошел ли он в час пик, что мешает своевременному прибытию пожарной команды на место происшествия.

Процедура построения диаграммы последствий состоит из выбора первого инициирующего события, за которым следуют другие события, определенные на данном этапе работы; после этого следует ответить на вопросы:

При каких условиях данное событие ведет к развитию последующих событий?

Каковы переменные условия для данного предприятия, которые ведут к развитию разных вариантов событий?

На какие другие элементы данное событие оказывает действие?

Какое последующее событие вызывается данным событием?

При анализе «причин — последствий» используются комбинированные методы дерева отказов (выявить причины) и дерева событий (показать последствия), причем вес явления рассматриваются в естественной последовательности их появления. Так же как и деревья отказов, их конструкция будет описана подробно дальше.

Деревья отказов и диаграммы причин — последствий являются сложными логическими структурами, их построение и количествен-

ный анализ требуют по меньшей мере твердых знаний булевой алгебры, теории множеств и других сложных разделов современной математики.

Основной целью анализа надежности и безопасности является уменьшение вероятности аварии и связанных с ними человеческих жертв, экономических потерь и нарушении в окружающей среде.

Человеческие потери включают:

- 1) гибель;
- 2) травмы;
- 3) болезни или утрату трудоспособности.

Экономическими потерями являются:

- 1) прекращение производства или обслуживания;
- 2) изготовление некондиционной продукции, некачественное обслуживание;
- 3) потери оборудования и капитальных сооружений.

Некоторыми видами нарушений в окружающей среде являются:

- 1) загрязнение воздуха и водоемов;
- 2) другие нарушения в окружающей среде, например появление неприятных запахов, вибраций, шума и т. д.

Потери случаются тогда, когда одни или несколько исходных отказов приводят к опасной ситуации в системе. Наиболее часто встречающимися типами исходных отказов являются:

1. События, относящиеся к человеческой деятельности:
 - а) ошибки оператора;
 - б) дефекты конструкции;
 - в) ошибки при обслуживании.
2. События, относящиеся к оборудованию:
 - а) утечка токсичной жидкости через клапан;
 - б) отсутствие смазочного материала в механизме;
 - в) неправильные сигналы чувствительных элементов.
3. События, связанные с окружающей средой:
 - а) землетрясения или оползни;
 - б) штормы, наводнения, торнадо;
 - в) самовозгорания, вызываемые искрами или молниями.

Опасности в системах часто вызываются сочетанием сразу нескольких типов отказов, т.е. отказами оборудования плюс ошибками человека и (или) стихийными бедствиями. К типичным мероприятиям, проводимым с целью минимизирования опасности и риска, относятся:

- 1) резервирование оборудования;
- 2) инспекция и профилактика;
- 3) установка защитных систем, таких как противопожарные спринклерные устройства, брандмауэры, предохранительные клапаны, системы аварийного охлаждения;
- 4) аварийная сигнализация.

Главной целью при изучении опасностей, свойственных системе, является определение причинных взаимосвязей между исходными аварийными событиями, относящимися к оборудованию, персоналу и окружающей среде и приводящими к авариям в системе, а также отыскание способов устранения вредных воздействий путем перепроектирования системы или ее усовершенствования.

Причинные взаимосвязи можно установить с помощью дерева отказов, которое затем подвергается качественному и количественному анализам. После того как сочетания исходных аварийных событий, ведущих к возникновению опасных ситуаций в системе, выявлены, система может быть усовершенствована и опасности уменьшены.

Метод анализа с помощью дерева отказов был разработан Х.А. Уотсоном в 1961-1962 гг. при проведении анализа системы управления запуском ракеты «Минитмен». Первыми публикациями были доклады, представленные в 1965 г. на симпозиуме по надежности, организованном Университетом штата Вашингтон и фирмой «Боинг», где группа специалистов, включавшая Д.Ф. Хаасля, Р.Дж. Шродера, У.Р. Джексона и др., использовала и развила эти методы.

Ценность дерева отказов заключается в следующем:

- 1) анализ ориентируется на отыскание отказов;
- 2) выявляются такие аспекты системы, которые имеют важное значение для рассматриваемых отказов;
- 3) обеспечивается графический, наглядный материал для той части руководства промышленности, которая детально не информируется о проводимых изменениях конструкции;
- 4) обеспечивается возможность проведения качественного или количественного анализа надежности системы;
- 5) метод позволяет специалисту поочередно сосредоточиваться на отдельных конкретных отказах системы;
- 6) обеспечивается глубокое проникновение в процесс работы системы.

К этому можно добавить, что деревья отказов, как и другие виды подобных технических материалов, являются средством общения специалистов, поэтому они должны быть представлены в четкой и наглядной форме.

Структура дерева отказов показана на рис. 3.

Нежелательное событие помещается сверху (конечное событие) и соединяется с рядом более элементарных исходных отказов путем констатации событий и логических символов. Главное преимущество дерева отказов по сравнению с другими методами заключается в том, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов системы и событий, которые приводят к данному конкретному отказу системы или аварии.

С начала 70-х годов были разработаны технические приемы анализа с помощью дерева отказов с применением вычислительных

машин, которые получили очень широкое распространение. В настоящее время это наиболее популярный метод, который в большинстве приложений заменил способ с применением структурных схем. На самом деле, проведение анализа при помощи дерева отказов или его ближайшего аналога — анализа причин последствий официально введено рядом правительственных учреждений, ответственных за безопасность рабочего персонала и (или) населения.

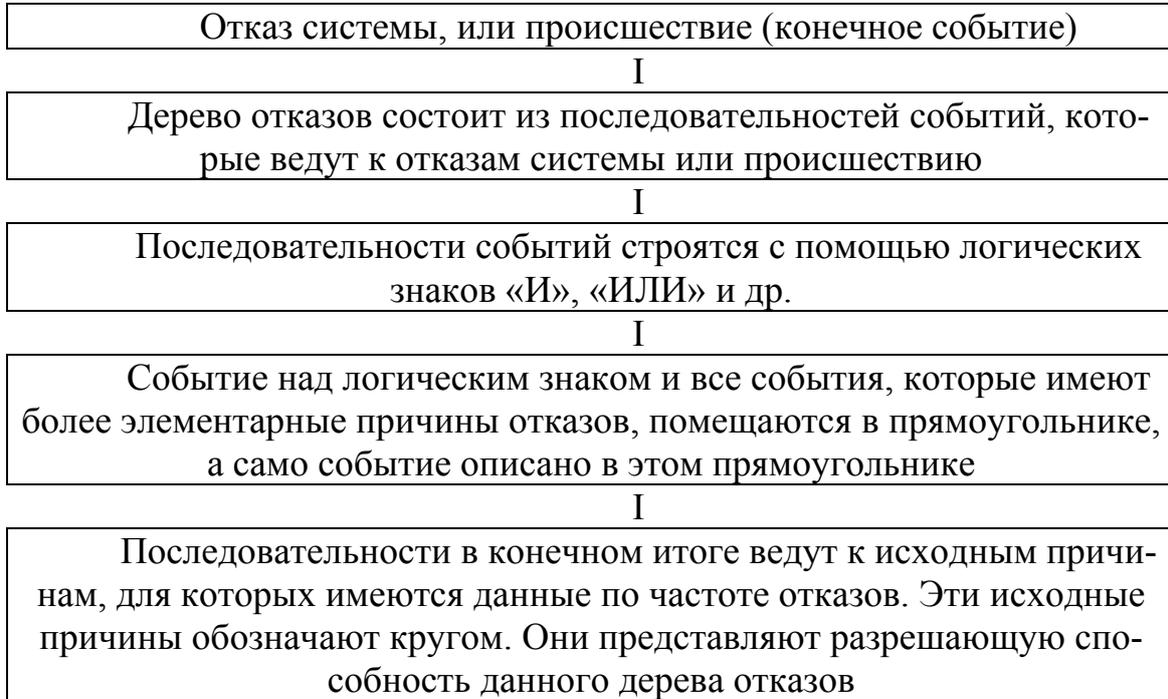


Рис. 3 – Основная структура дерева отказов

Однако последний метод является более универсальным, чем метод дерева отказов и найдет более широкое применение в будущем. Его универсальность вытекает из следующих факторов.

1. Могут быть показаны несколько состояния отказа элемента. Дерево отказов представляет собой схему булевой логики, на которой показывается только два состояния: рабочее и отказавшее, например функционирующий клапан и отказавший. В таблицах решений можно показать дополнительные состояния, такие, как «сокращенный расход через клапан» и т.д.

2. В системах, имеющих контуры регулирования, а также другие особенности, время возникновения и (или) последовательность событий при отказах имеют важное значение. Дерево отказов описывает систему в определенный момент времени (обычно в установившемся состоянии), и последовательности событий могут быть показаны с большим трудом, если это вообще оказывается возможным; в то же время приемы, основанные на таблицах решений, могут быть легко распространены даже на такие сложные устройства, как многоконтурные системы управления. Диаграммы причины — последствия потен-

циально также применимы для анализа систем с более сложной логикой, чем деревья отказов.

Таблицы решений — это не графический способ представления информации, каким являются деревья отказов или диаграммы причин — последствий. Однако когда дерево отказов становится очень громоздким, трудно отыскивать ошибки, а логические связи с трудом поддаются прослеживанию или становятся слишком запутанными

Вывод: построение дерева отказов является, по-видимому, определенным видом искусства в науке. Нет двух аналитиков, которые составили бы два идентичных дерева отказов (хотя эти деревья должны быть эквивалентными в смысле выявляемых видов отказов).

ЛИТЕРАТУРА

1 Бойко К.В., Карабанов Ю.Ф., Печеркин А.С. и др. Разработка основных требований к системам управления промышленной безопасностью как одно из направлений совершенствования методологии надзорной деятельности // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2003. – вып. 1. – С. 122 – 141.

2 Гарсиа М.Л. Проектирование и оценка систем физической защиты. – М.: Мир: АСТ, 2003. – 386 с.

3 Дзекцер Е.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Экспертная система как инструмент оперативного принятия решений в ЧС подтопления зданий и инженерных сооружений // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 1998. – вып. 12. – С. 53 – 62.

4 Дорожко С.В., Пустовит В.Т., Морзак Г.И. Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность. Часть 1. Чрезвычайные ситуации и их предупреждение. – Мн.: ЧП „Технопринт”, 2001. – 222 с.

5 Дорожко С.В., Пустовит В.Т., Морзак Г.И., Мурашко В.Ф. Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность. Часть 2. Системы выживания и защита территорий в чрезвычайных ситуациях. – Мн.: ЧП „Технопринт”, 2002. – 261 с.

6 Кононов Д.А., Кульба В.В., Малинецкий Г.Г. Сценарии поведения сложных систем в чрезвычайных ситуациях // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2001. – вып. 5. – С. 4 – 19.