

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Институт машиностроения и автомобильного транспорта
Кафедра «Автотранспортная и техносферная безопасность»

Методические указания к практическим занятиям
по дисциплине
«Надежность технических систем и техногенный риск»

часть 3

Составитель:
Киндеев Е.А.

Владимир, 2016

Темы практических занятий.

1. Построение «дерева отказов».
2. Построение «дерева событий».

Возникновение и ход протекания промышленных аварий и техногенных катастроф, как правило, характеризуются комбинацией различных случайных локальных событий, возникающих с заранее неизвестной вероятностью на разных стадиях аварии (отказы оборудования; человеческие ошибки при проектировании и эксплуатации; воздействия непредсказуемых форс-мажорных обстоятельств). Для того чтобы выявить причинно-следственные связи между этими событиями, необходимо применить логико-графические методы построения деревьев отказов и событий.

При построении *дерева отказов* выявляют комбинации отказов оборудования, ошибок персонала и внешних (природных или техногенных) воздействий, приводящих к основному событию (аварийной ситуации). Метод используется для определения возможности возникновения аварийной ситуации и расчета ее вероятности (на основе задания вероятностей исходных событий).

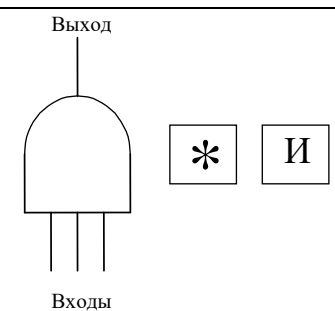
Дерево событий – последовательность событий, исходящих из основного (конечного) события (аварийная ситуация). Применяется для анализа развития аварийной ситуации.

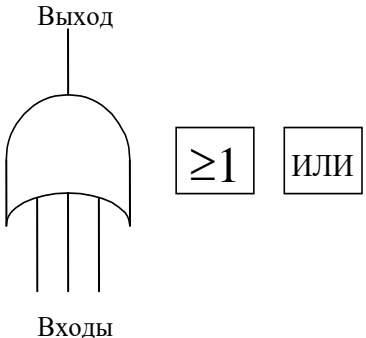
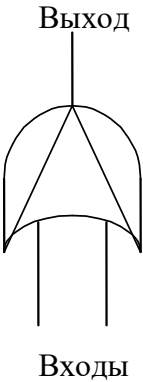
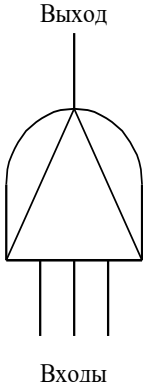
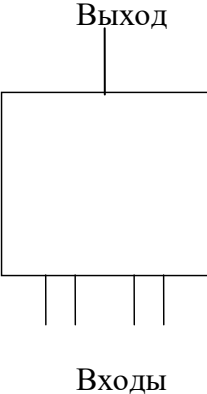
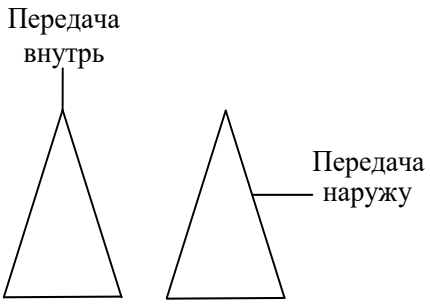
Определения и символы, используемые при построении деревьев

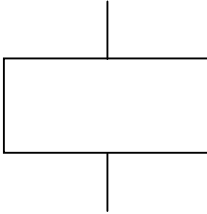
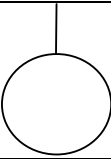

При построении деревьев отказов и деревьев событий принято использовать специальные символы и условные обозначения. Ниже приведена табл. 7.1 с наиболее часто употребляемыми из них.

Таблица 7.1

Определения и символы

Определение	Символ
1. <i>Схема «И»</i> (схема совпадения) – сигнал на выходе появляется только тогда, когда поступают все входные сигналы (умножение событий)	

<p>2. <i>Схема «ИЛИ»</i> (схема объединения) – сигнал на выходе появляется при поступлении на вход любого одного или большего числа сигналов (сумма событий)</p>	
<p>3. <i>Схема «Исключающее ИЛИ»</i>: сигнал на выходе рассматривается как промежуточное событие и появляется при поступлении на вход одного и только одного входного сигнала</p>	
<p>4. <i>Схема «И с приоритетом»</i>: логически эквивалентна схеме «И», но входные сигналы должны поступать в определенном, заранее заданном порядке</p>	
<p>5. <i>Специальная схема</i>: отображает любую другую разрешенную комбинацию входных сигналов</p>	
<p>6. <i>Вход</i> или <i>выход</i> изображаются с помощью треугольников, что позволяет избежать повторения отдельных участков дерева. Прямая, входящая в вершину треугольника, означает переход внутрь соответствующей ветви, а прямая, берущая начало из середины боковой стороны</p>	

треугольника, – переход к другой ветви	
7. <i>Результирующее событие</i> : наступает в результате заранее определенной комбинации неисправностей на входе логической схемы	
8. <i>Первичный отказ (или неисправность элемента)</i>	
9. <i>Неполное событие</i> – это неисправность, причины которой на данном этапе исследования не удалось однозначно определить из-за отсутствия необходимой информации или она не представляет интереса. Такое событие может быть детализировано путем показа вызывающих его первичных неисправностей	

Анализ деревьев отказов

Опасности существуют всегда, но явно проявляются лишь в исключительных случаях. Для реализации потенциальной опасности необходимо выполнение определенных условий, которые принято называть *причинами возникновения опасности*.

Опасность – следствие некоторой причины или группы причин, которые, в свою очередь, могут являться следствием другой причины или группы причин. Причины и следствия образуют сложные иерархические структуры или системы, для графической иллюстрации этих структур и систем используют следующие схемы: дерево событий, дерево причин, дерево отказа, дерево опасности, дерево неисправностей.

Процедура построения дерева неисправностей (отказов) включает, как правило, следующие этапы:

1. Определение нежелательного (завершающего) события.
2. Тщательное изучение предполагаемого режима использования системы и её возможное поведение.

3. Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей системы и проведение более глубокого анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.

4. Построение дерева неисправностей (отказов) для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться в терминах идентифицируемых независимых первичных отказов. Чтобы получить количественные результаты для завершающего нежелательного события дерева, необходимо задать вероятность отказа, коэффициент готовности, интенсивность отказов, интенсивность восстановлений и другие показатели, характеризующие первичные события, при условии, что события дерева неисправностей не являются избыточными.

Более строгий и систематический анализ предусматривает выполнение следующих процедур: определение границ системы, построение дерева неисправностей, качественная оценка, количественная оценка.

Обычно система изображается в виде блок-схемы, показывающей все функциональные взаимосвязи и элементы. При построении дерева неисправностей исключительно важную роль приобретает правильное задание граничных условий. Одним из основных требований, предъявляемых к граничным условиям, является выбор завершающего нежелательного события, произвести который необходимо с особой тщательностью, поскольку именно для него и строится дерево неисправностей. Кроме того, чтобы проводимый анализ был понятен всем заинтересованным лицам, исследователь обязан составить перечень всех допущений, принимаемых при определении системы и построении дерева неисправностей.

Построение дерева отказов

Прежде чем приступить к построению дерева неисправностей необходимо самым тщательным образом изучить техническую систему. Дерево отказов используется для условного представления существующих в технической системе условий, потенциально способных вызвать ее отказ, а также для выявления существующих в ней слабых с точки зрения надежности мест. В зависимости от конкретных целей анализа дерева неисправностей для построения последнего специалисты по надежности обычно используют либо метод

первичных отказов, либо метод вторичных отказов, либо метод инициированных отказов.

Метод первичных отказов. Отказ элемента называется первичным, если он происходит в нормальных условиях функционирования системы. Построение дерева неисправностей на основе учета первичных отказов не представляет большой сложности, так как дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ системы. Для иллюстрации этого метода рассмотрим следующий пример.

Пример 1. Построить дерево отказов для простейшей системы освещения, электрическая схема которой показана на рис. 1. Электрическая лампочка 2 последовательно соединена через выключатель 1 с источником питания 3. Считается, что отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, отказами электрической проводки можно пренебречь, а завершающим событием является отсутствие освещения.

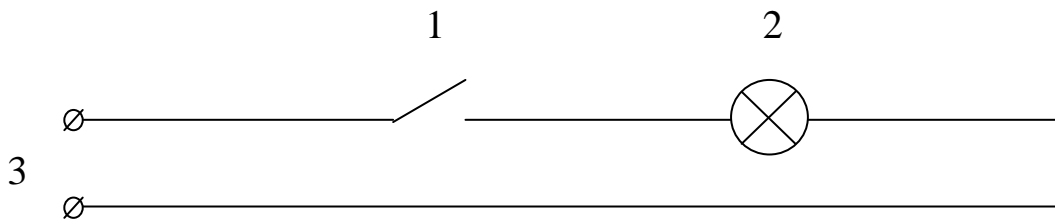


Рис. 1. Электрическая схема системы освещения

Дерево отказов для этой системы представлено на рис 2. Основными, или первичными, событиями дерева неисправностей являются (1) отказ источника питания E_1 , (2) отказ выключателя E_2 и (3) перегорание (отказ) лампочки E_3 .

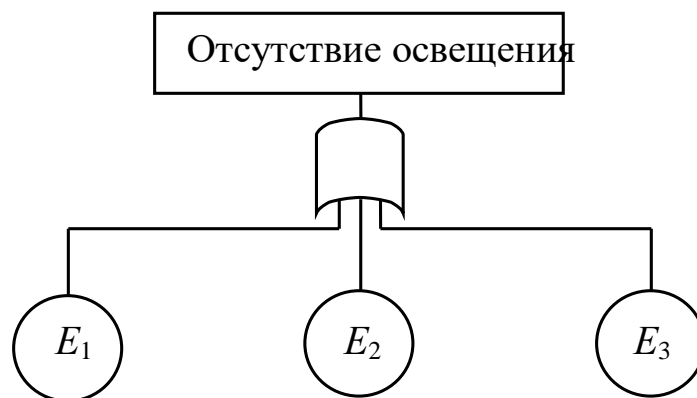


Рис. 2. Дерево отказов для случая первичных отказов

Наибольший интерес представляет завершающее событие – «отсутствие освещения», и поэтому именно ему уделяется основное внимание при анализе. Дерево неисправностей, изображенное на рис. 2, показывает, что исходные события представляют собой входы схемы «ИЛИ»: при наступлении любого из трех первичных событий E_1 , E_2 , E_3 происходит завершающее событие (отсутствие освещения).

Метод вторичных отказов. Так как вторичные отказы могут вызываться неблагоприятным воздействием окружающих условий, чрезмерными нагрузками на элементы системы в процессе эксплуатации или первичными отказами самих элементов системы, необходимо более глубокое исследование технической системы.

Пример 2. На рис 3 показано простое дерево неисправностей с завершающим событием «прекращение выработки электроэнергии генератором». Дерево отказов отображает такие первичные события, как отказ выключателя (отсутствие замыкания), неисправности внутренних цепей генератора и предохранителя. Вторичные отказы изображаются прямоугольником как промежуточное событие.

Вторичные отказы, изображенные на рис.3, происходят вследствие неудовлетворительного технического обслуживания, неблагоприятного воздействия внешней среды, стихийного бедствия и т. д.

Метод инициированных отказов. Подобные отказы возникают при правильном использовании элемента, но в неустановленное время или в неполюженном месте. Другими словами, инициированные отказы – это сбои операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события (нежелательного либо конечного).

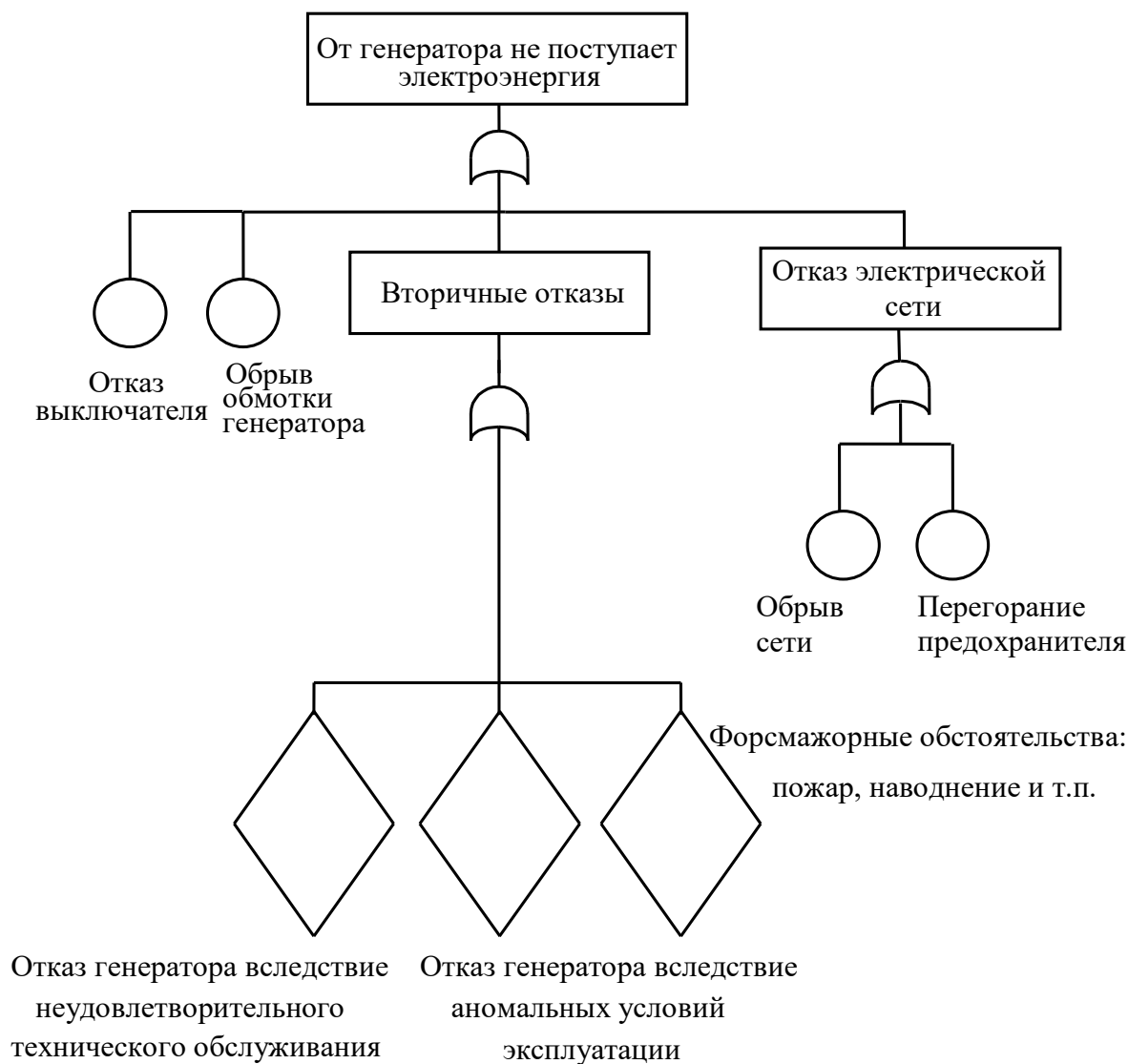


Рис. 3. Дерево неисправностей для случая вторичных отказов

Пример 3. Типичный пример инициированного отказа – поступление ошибочного сигнала на какое-либо электротехническое устройство (например, двигатель или преобразователь). Взаимосвязь между основными и инициированными отказами показана на рис. 4.

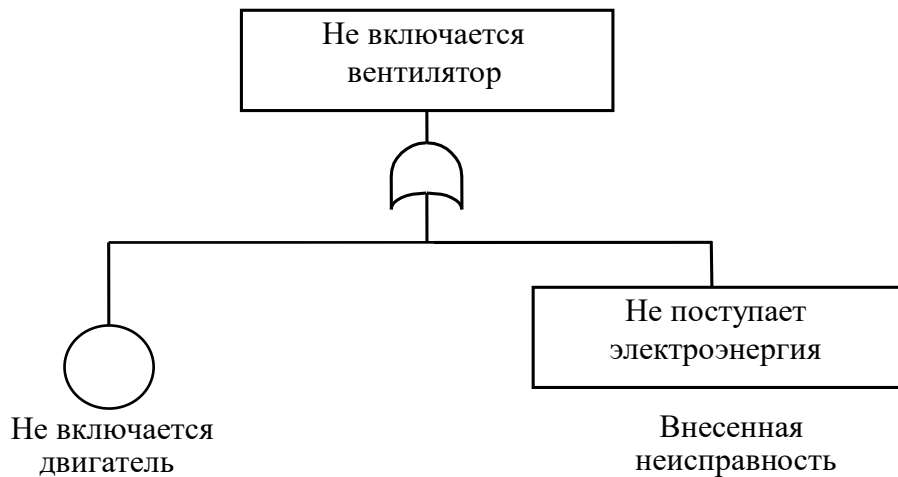


Рис. 4. Дерево неисправностей для случая основных и инициированных отказов

Многообразие причин аварийности и травматизма наиболее полно и удобно представляется в виде диаграммы – дерева причин, отражающей процесс появления и развития цепи предпосылок. Основными компонентами диаграммы причин или опасностей являются узлы (или вершины) и взаимосвязи между ними. В качестве узлов подразумеваются события, свойства и состояния элементов рассматриваемой системы, а также логические условия их трансформации (сложение «ИЛИ» и перемножение «И»).

Операция «И» означает, что перед тем, как произойдет некоторое событие «А», должно произойти несколько событий, например, «Б» и «В».

В вероятностном аспекте такая операция выражается логическим произведением

$$P(A) = P(B)P(V). \quad (1)$$

Операция «ИЛИ» означает, что некоторое событие «Г» будет иметь место, если произойдет хотя бы одно из нескольких событий или все события, например, «Д» и «Е».

В этом случае вероятность появления события «Г» будет иметь вид алгебраической суммы

$$P(\Gamma) = P(D) + P(E) - P(D)P(E). \quad (2)$$

Пример 4. Гибель человека от поражения электрическим током может произойти при включении его тела в электрическую цепь с достаточной для нанесения поражения силой тока. Следовательно, чтобы произошел несчастный случай (головное событие «А»), необходимо одновременное существование трех событий (рис. 5).

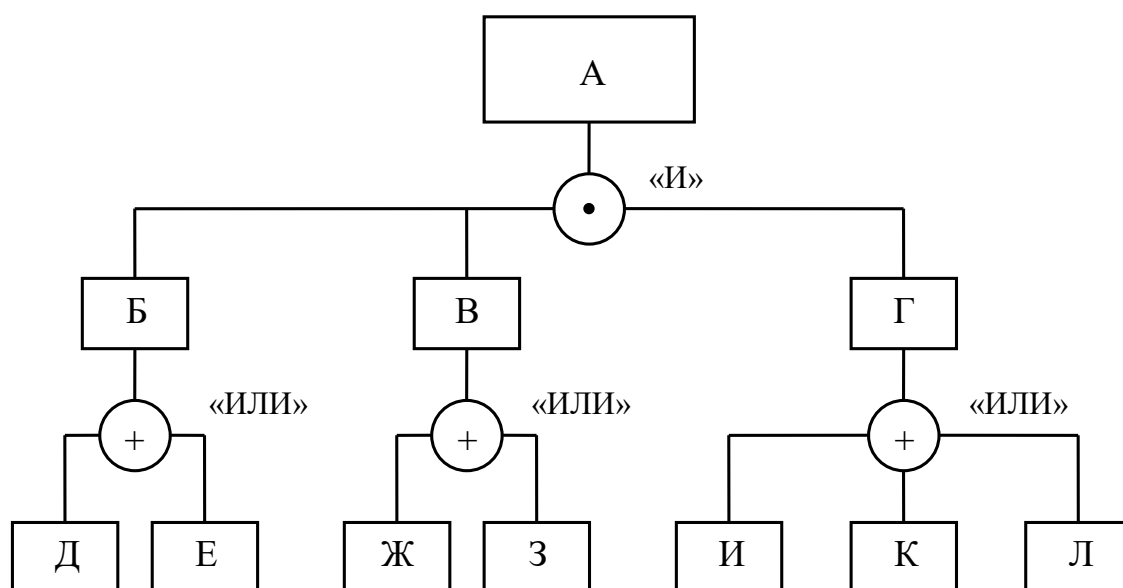


Рис. 5. Дерево причин поражения человека электрическим током

Событие «Б» – наличие потенциально высокого напряжения на корпусе электрической установки.

Событие «В» означает появление человека на токопроводящем основании, соединенном с землей.

Событие «Г» – касание телом человека корпуса электроустановки.

В свою очередь, событие «Б» может быть следствием любого из двух событий – предпосылок «Д» и «Е», где «Д» – понижение сопротивления изоляции токоведущих частей, «Е» – касание токоведущими частями корпуса установки.

Событие «В» также обуславливается двумя предпосылками: «Ж» – вступление человека на токопроводящее основание, «З» – касание незащищенной поверхностью тела человека заземленных элементов помещения.

Событие «Г» является результатом появления одной из трех предпосылок: «И» – потребность ремонта, «К» – потребность техобслуживания, «Л» – использование электроустановки по назначению, или нормальная эксплуатация установки.

Анализ дерева опасности состоит в выявлении условий, минимально необходимых и достаточных для возникновения или невозникновения головного события «А». Аналитически выражение условия реализации данного несчастного случая имеет вид:

$$P(A) = P(B) P(V)P(\Gamma) = [P(D)+P(E)] [P(Ж)+P(З)] [P(И)+P(К)+P(Л)]. \quad (3)$$

Пример 5. В автотранспортном предприятии автомобиль-тягач из-

за технической неисправности был отправлен в ремонт, а на замену ему из резерва был взят другой. Никто не обратил внимания на то, что резервный автомобиль-тягач оказался другой модели. Сцепное устройство резервного автомобиля было такой же конструкции, только расположено на другой высоте от земли.

Во дворе предприятия водитель автомобиля приступил к сцепке тягача с прицепом. Из-за того, что сцепные устройства тягача и прицепа оказались расположены на различной высоте, произвести сцепку оказалось невозможно. Водитель покинул автомобиль для того, чтобы выяснить причину невозможности произвести сцепку, забыв поставить тягач на стояночный тормоз. В тот момент, когда водитель находился между прицепом и тягачом, тягач из-за вибрации, вызванной работающим двигателем, покати́лся назад по небольшому уклону и придавил водителя к раме прицепа. В результате водитель получил телесные повреждения средней тяжести.

Дерево причин данного несчастного случая представлено на рис. 6.

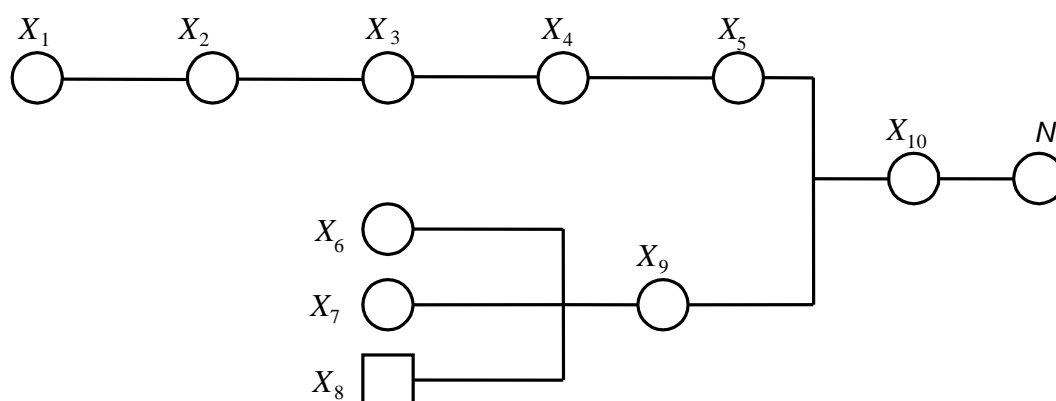


Рис. 6. Дерево причин аварии автомобиля-тягача:

X₁ – обычно используемый тягач вышел из строя;

X₂ – другой тягач использовался в работе;

X₃ – различие в высоте прицепа и нового тягача;

X₄ – сцепка невозможна;

X₅ – водитель встает между тягачом и прицепом;

X₆ – не включен ручной тормоз;

X₇ – вибрации от работающего двигателя;

X₈ – двор имеет уклон;

X₉ – тягач движется к прицепу;

X₁₀ – водитель зажимается между прицепом и тягачом;

N – несчастный случай (травма)

Заметим, что X_8 – фактор постоянного характера, а остальные факторы носят случайный характер.

Анализ происшествия состоит в выяснении причин несчастного случая, выявлении источников опасности и выработке предупредительных мероприятий. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа происшествия

Причины несчастного случая	Источники опасности	Предупредительные мероприятия
Двор с уклоном	Неподходящее место стоянки автомобилей	Реконструкция двора
Тягач, вышедший из строя	Поломка оборудования	Предупредительный ремонт транспортных средств
Разная высота расположения сцепных устройств прицепа и тягача	Техническая несовместимость оборудования	Стандартизация соединения оборудования
Не включен стояночный тормоз, работающий двигатель	Недостаточная подготовка персонала	Инструктаж водителей

Пример 6. При построении дерева событий для определения безопасности выполнения сварочных работ исходное событие аварии (ИСА) – искра, вызывающая возгорание. В случае возникновения задымления в помещении автоматически срабатывает спринклерная система пожаротушения (ССП). При большом очаге пожара необходимо в соответствии с инструкцией включить систему пожаротушения (СП) и вызвать пожарных. Возможное «дерево событий» представлено на рис. 7, а, где «ступенька» вверх означает срабатывание соответствующей системы, а «ступенька» вниз – ее отказ.

ИСА	ССП	СП	Конечное состояние
-----	-----	----	--------------------

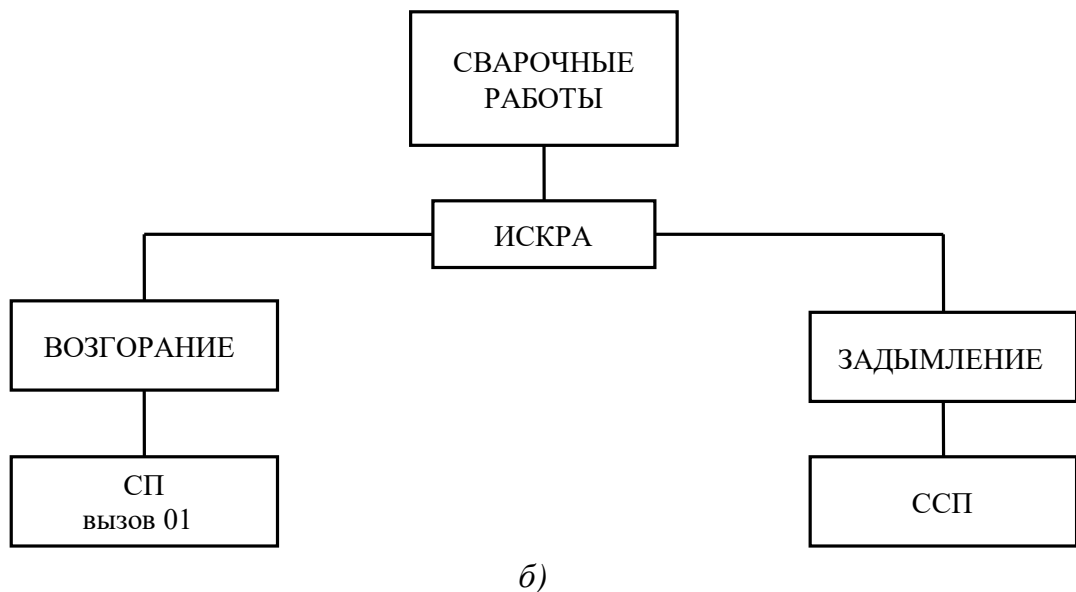
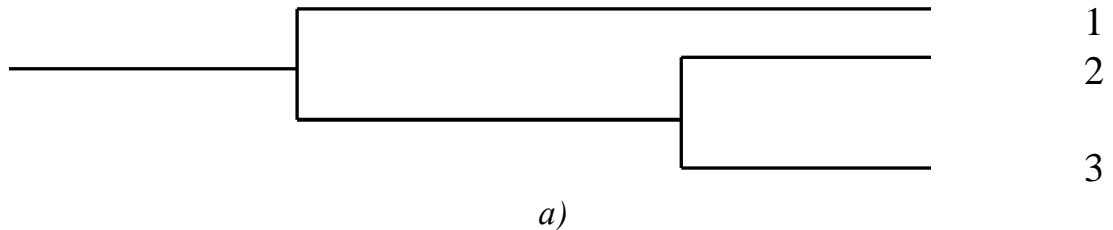


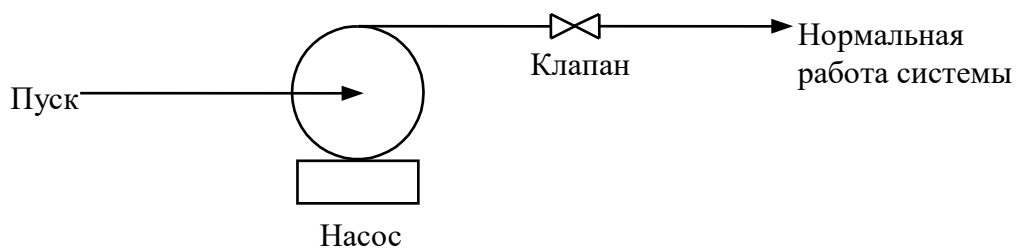
Рис. 7. Дерево событий при выполнении сварочных работ:
а – принципиальная схема; б – диаграмма событий

Анализ конечных условий показывает, что состояние под номером 3 связано с тяжелыми последствиями, поэтому путь, приводящий к конечному состоянию 3, является аварийным. Если известны вероятность наступления ИСА и вероятность отказов ССП и СП, то с помощью методов теории вероятностей можно рассчитать риск пожара с тяжелыми последствиями.

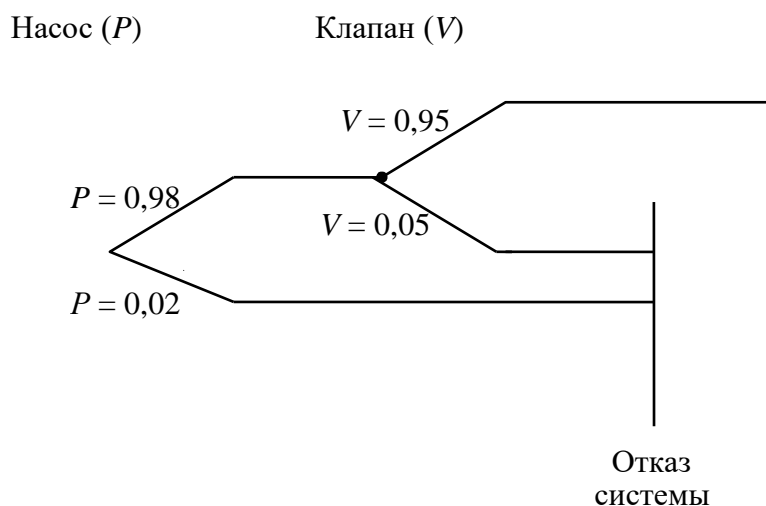
При анализе очередного исходного события аварии аналогичным образом строится соответствующее «дерево событий», определяются возможные аварийные цепочки и вычисляется вероятность их реализации. В окончательном виде величина риска $R = \sum r_i$, где r_i – вероятность реализации i -й аварийной цепочки.

Пример 7. На рис. 8. показана система последовательно соединенных элементов, которая включает насос и клапан, имеющие соответственно вероятности безотказной работы 0,98 и 0,95, а также

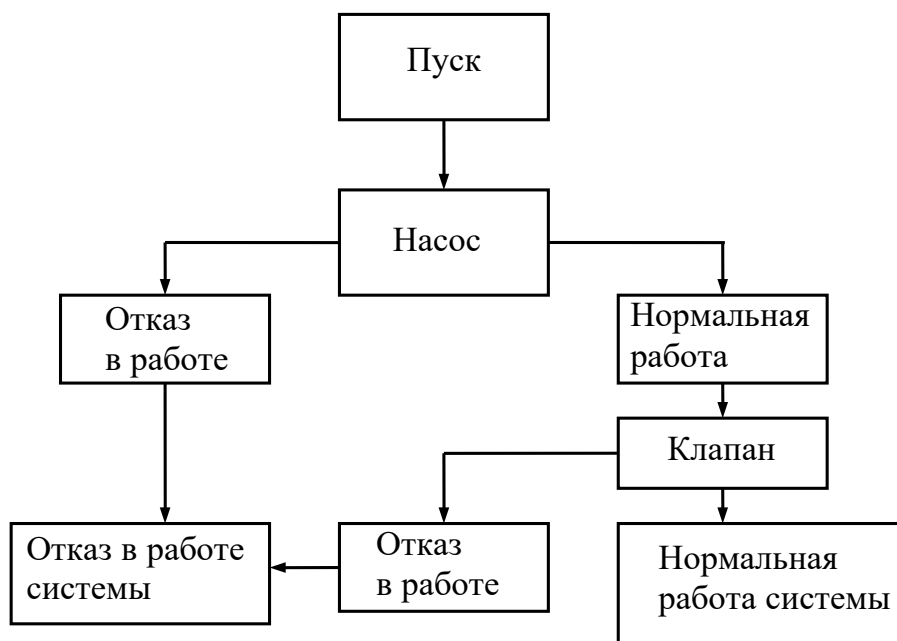
приведено дерево решений для этой системы. Согласно принятому правилу верхняя ветвь соответствует желательному варианту работы системы, а нижняя – нежелательному. Дерево решений читается слева направо. Если насос не работает, система отказывает независимо от состояния клапана. Если насос работает, с помощью второй узловой точки изучается ситуация, работает ли клапан.



а)



б)



в)

Рис. 8. Дерево решений для двухэлементной схемы (работа насоса):
 а – принципиальная схема; б – дерево решений; в – диаграмма решений

Вероятность безотказной работы системы $P = 0,98 \cdot 0,95 = 0,931$.
 Вероятность отказа $Q = 0,98 \cdot 0,05 + 0,02 = 0,069$, и суммарная
 вероятность двух состояний системы равна единице.

Этот результат можно получить другим способом с помощью
 таблицы истинности (табл. 2).

Таблица 2

Таблица истинности

Состояние насоса	Состояние клапана	Вероятность работоспособного состояния системы	Вероятность отказа системы
Работает	Работает	$0,98 \times 0,95$	–
Отказ	Работает	–	$0,02 \times 0,95$
Работает	Отказ	–	$0,98 \times 0,05$
Отказ	Отказ	–	$0,02 \times 0,05$
Суммарная величина		0,931	0,069

Методы анализа деревьев – наиболее трудоемкие, они применяются для анализа проектов или модернизации сложных технических систем и производств и требуют высокой квалификации исполнителей.

Качественная и количественная оценка дерева отказов

Излагаемый ниже подход основан на использовании так называемых минимальных сечений дерева неисправностей.

Сечение определяется как множество элементарных событий, приводящих к нежелательному исходу. Если из множества событий, принадлежащих некоторому сечению, нельзя исключить ни одного, и в то же время это множество событий приводит к нежелательному исходу, то в этом случае говорят о наличии *минимального сечения*. Выявление минимальных сечений требует больших затрат времени, и для их нахождения требуется машинный алгоритм. Пример качественной оценки дерева неисправностей представлен на рис. 9.

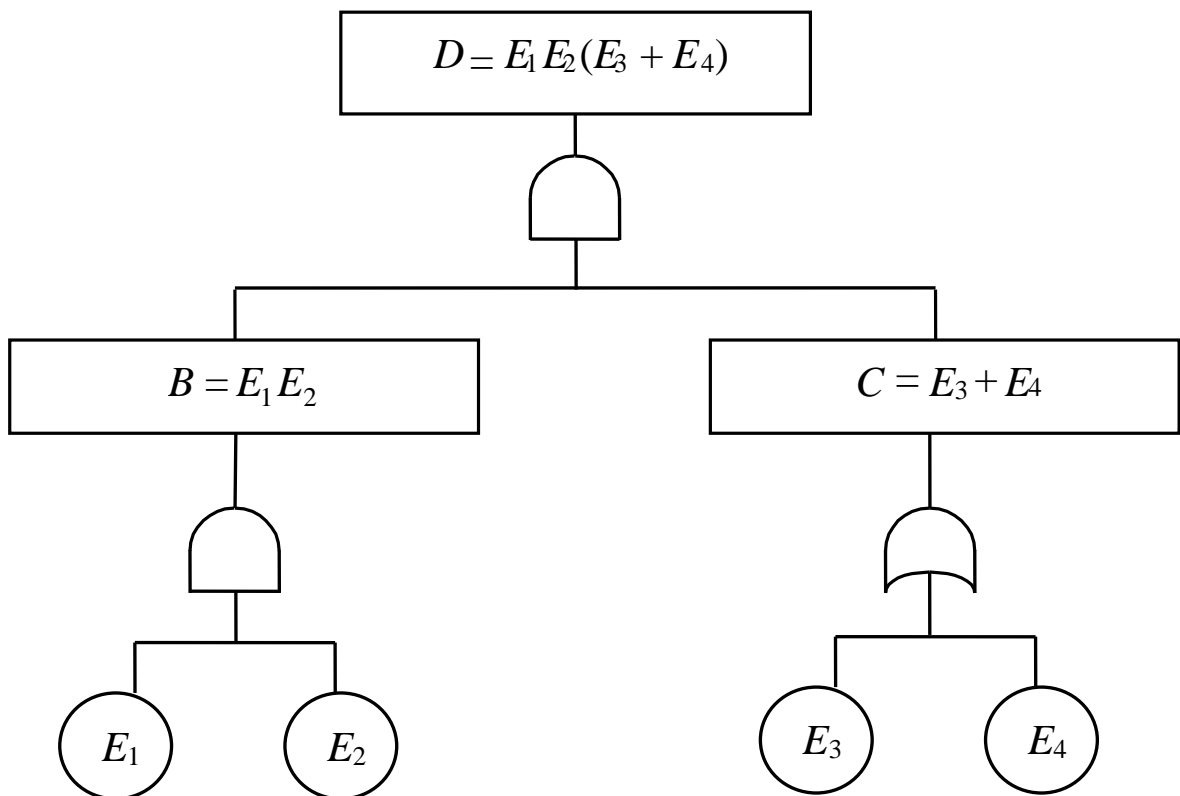


Рис. 9. Дерево неисправностей для гипотетического случая

Примечание. Промежуточный отказ может появиться только в том случае, когда имеют место оба события E_1 и E_2 . Что касается промежуточного события C , то оно может произойти только при появлении события E_3 или E_4 . Завершающее событие наступает только при появлении одновременно промежуточных событий B и C .

Количественная оценка производится на основании информации о таких количественных показателях надежности для завершающего

события, как вероятность отказа, интенсивность отказов или интенсивность восстановлений. В первую очередь вычисляют показатели надежности элемента, затем находят критический путь и, наконец, оценивают завершающее событие.

В первом случае дерево неисправностей моделируется на компьютере обычно для нескольких тысяч или даже миллионов циклов функционирования системы. При этом основными этапами моделирования являются:

- задание показателей надежности для элементарных событий;
- программирование модели дерева неисправностей;
- составление перечня отказов, приводящих к завершающему событию, и перечня соответствующих минимальных сечений;
- вычисление требуемых конечных результатов.

Во втором случае используют существующие аналитические методы.

Аналитический вывод для простых схем дерева отказов

Для того чтобы дерево неисправностей отвечало своему назначению в нем используются схемы, показывающие логические связи между отказами основных элементов системы и завершающим событием. Для представления этих логических схем в математической форме применяются основные законы булевой алгебры.

Схема «ИЛИ» изображается символами U или «+». Любой из этих символов показывает объединение событий, связанных со схемой «ИЛИ». Математическое описание схемы «ИЛИ» с двумя событиями на входе дано на рис. 10.

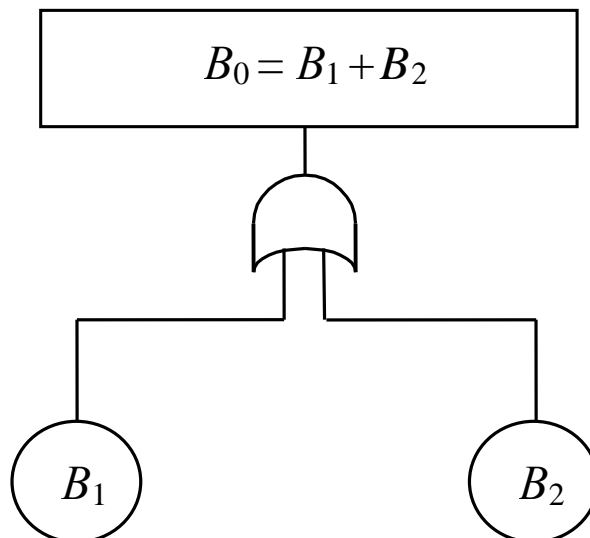


Рис. 10. Схема ИЛИ с двумя входами

Событие B_0 на выходе схемы «ИЛИ» записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 + B_2, \quad (4)$$

где B_1 и B_2 – события на входе.

Схема «И» изображается символом «·» или «П». Этот символ обозначает пересечение событий. Схема «И» с двумя входами показана на рис. 11.

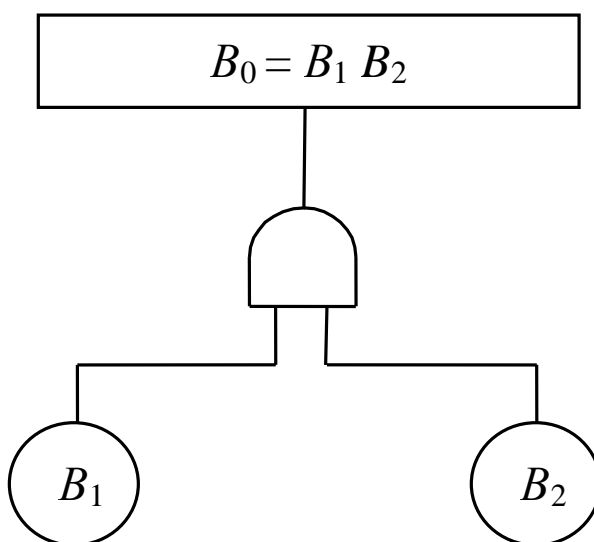


Рис. 11. Схема «И» с двумя входами

Событие B_0 на выходе схемы «И» записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 B_2. \quad (5)$$

Схема «И с приоритетом» логически эквивалентна схеме «И», но отличается от нее тем, что события на ее входе должны происходить в определенном порядке. Схема «И с приоритетом», имеющая два входа, показана на рис. 12. В данном случае предполагается, что событие A_1 должно наступить раньше события A_2 .

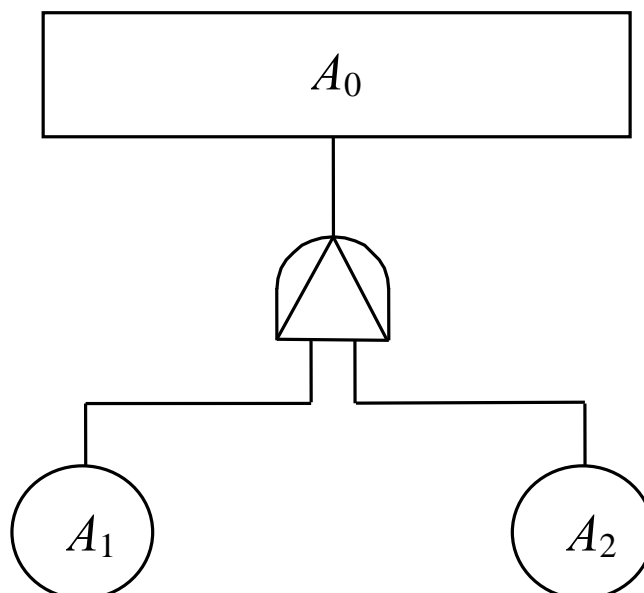


Рис. 12. Схема «И с приоритетом» с двумя входами

6. Дерево с повторяющимися событиями

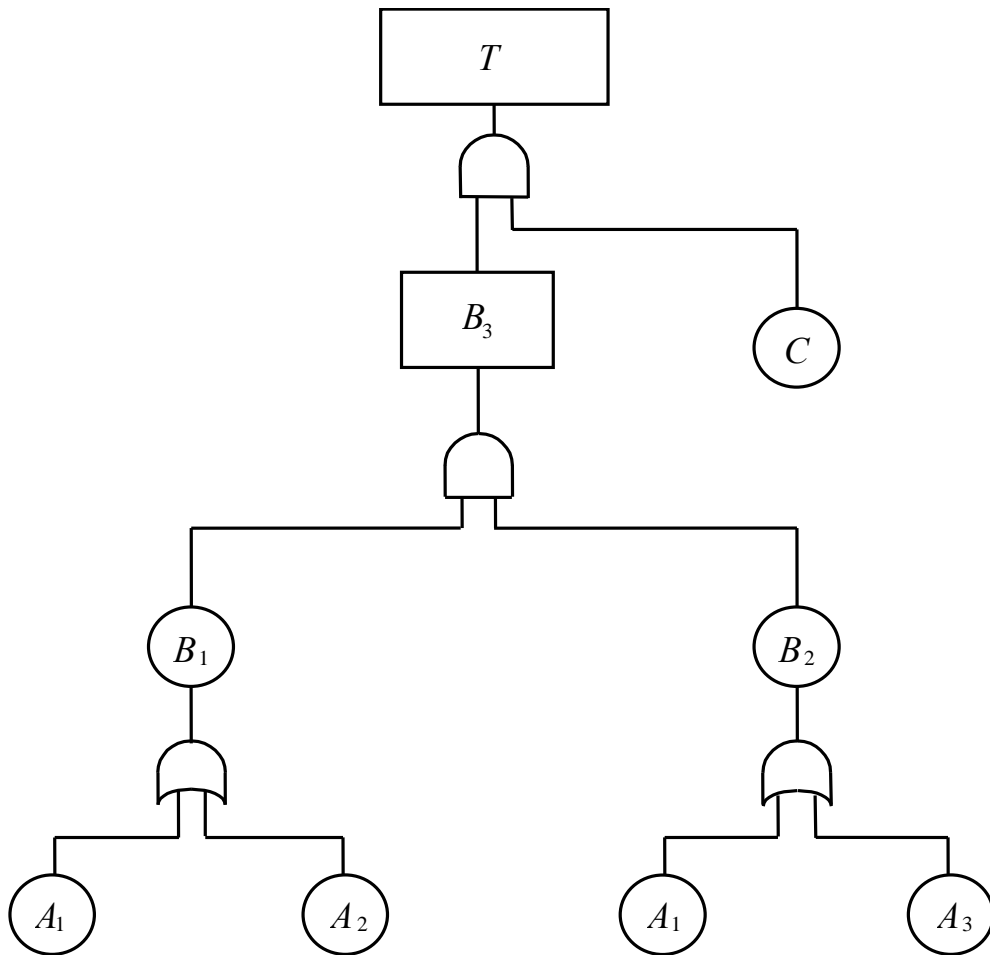
Характерная конфигурация такого дерева неисправностей показана на рис. 13.

В этом случае дерево неисправностей можно представить с помощью следующих булевых выражений:

$$T = C B_3, \quad B_1 = A_1 + A_2, \\ B_3 = B_1 B_2, \quad B_2 = A_1 + A_3.$$

Подставляя в первое выражение соотношения для B_1 , B_2 и B_3 , получаем

$$T = C(A_1 + A_2)(A_1 + A_3).$$



*Рис. 13. Дерево отказов в случае повторяющихся событий:
 A_1, A_2, A_3 и C – элементарные события; B_1, B_2, B_3 – промежуточные события; T – завершающее событие*

Из рис. 13 видно, что отказ A_1 является повторяющимся элементарным событием, поэтому полученное выражение необходимо упростить, используя распределительный закон булевой алгебры.

В результате получаем $T = C [A_1 + A_2 A_3]$, и первоначальное дерево неисправностей (см. рис. 13) принимает вид, показанный на рис. 14.

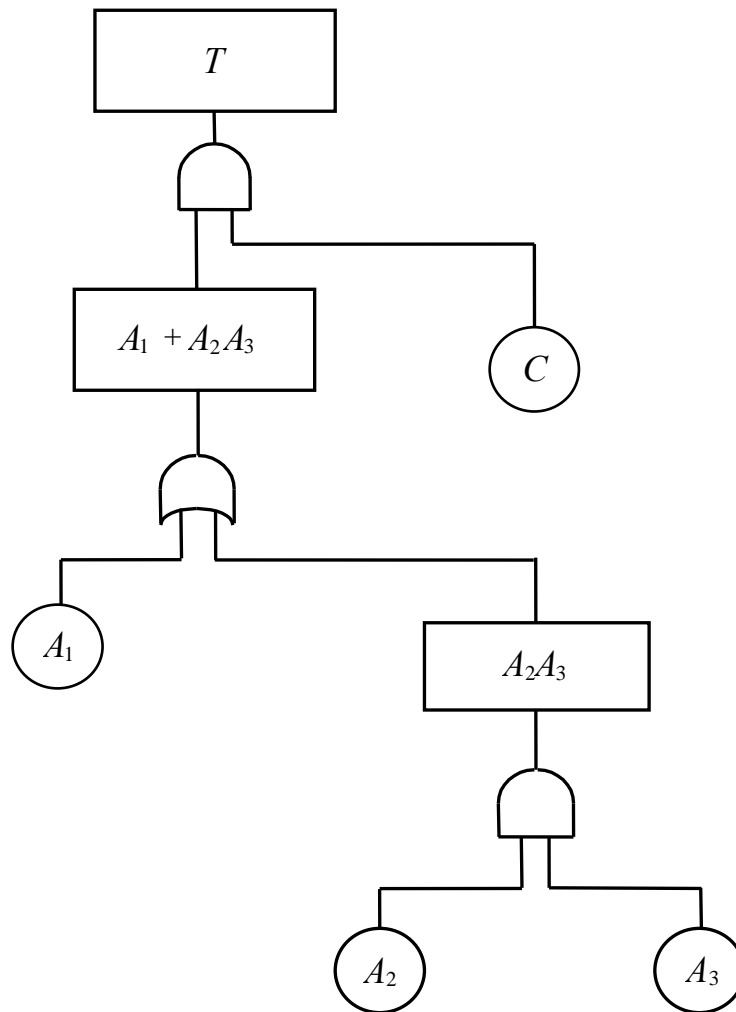


Рис. 14. Упрощенное дерево неисправностей

Таким образом, прежде чем находить количественные показатели надежности и риска, целесообразно упростить выражения с повторяющимися событиями, используя свойства булевой алгебры.

7. Вероятностная оценка дерева отказов

Схема «ИЛИ». Для пояснения вероятностного аспекта работы этой схемы проанализируем схему «ИЛИ» с двумя входами, изображенную на рис. 7.15. Для этой схемы вероятность появления завершающего события имеет вид

$$P(T) = P(a) + P(b) - P(a \cdot b). \quad (6)$$

Если a и b – статистически независимые события и произведение $P(a)P(b)$ очень мало, то полученное выражение можно приближенно записать как

$$P(T) \approx P(a) + P(b). \quad (7)$$

В случае схемы «ИЛИ» с n входами имеем

$$P(a + b + c + \dots + n) \approx P(a) + P(b) + P(c) + \dots + P(n). \quad (8)$$

Это приближенное выражение дает хорошие результаты, если вероятности появления элементарных событий $P(a)$, $P(b)$, $P(c)$, ... , $P(n)$ очень малы, и точный результат, если события a , b , c , ... , n являются несовместными.

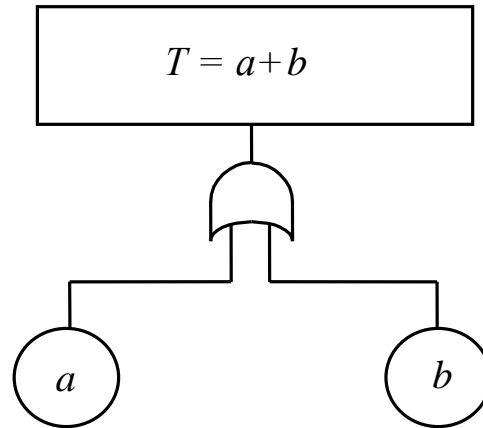


Рис. 15. Схема «ИЛИ» с двумя входами

Схема «И». В случае схемы «И» с двумя входами (рис. 16) события a и b статистически независимы и для получения вероятности появления завершающего события применяется правило умножения вероятностей:

$$P(ab) = P(a) P(b). \quad (9)$$

Для схемы «И» с n входами данное выражение можно записать в общем виде:

$$P(a b c \cdots n) = P(a) P(b) P(c) \cdots P(n). \quad (10)$$

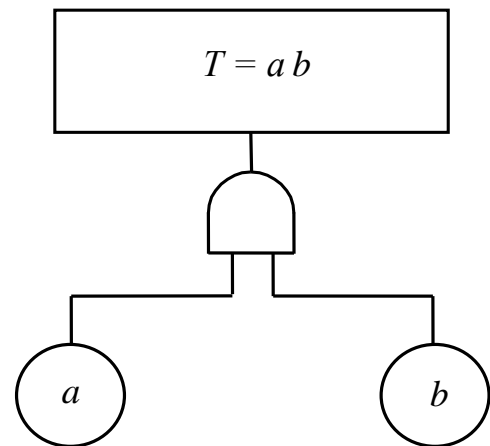


Рис. 16. Схема «И» с двумя входами

Пример 8. Требуется вычислить вероятность появления завершающего события гипотетического дерева неисправностей, изображенного на рис. 17.

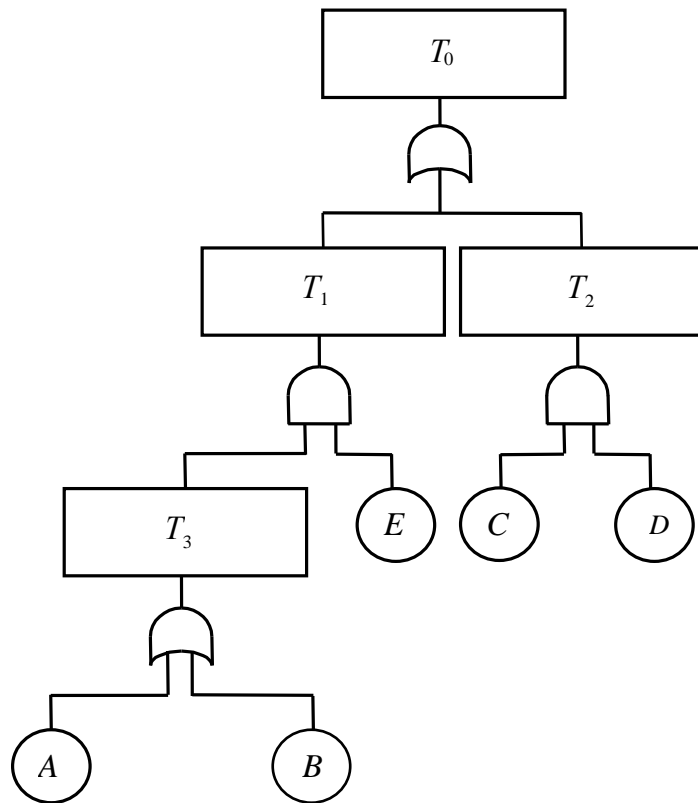


Рис. 17. Гипотетическое дерево событий

Допустим, что основные события A , B , C , D и E статистически независимы и что $P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = P(E) = 1/5$. В данном случае дерево не содержит повторяющихся элементарных событий, поэтому можно вычислить вероятность конкретных событий на выходе каждой логической схемы. Однако, если бы в ветвях дерева неисправностей присутствовали повторяющиеся события, то прежде чем вычислять вероятности тех или иных событий на выходе каждой логической схемы, необходимо было бы исключить повторяющиеся события (т.е. получить минимальные сечения).

Для данного дерева неисправностей решение может быть получено двумя методами.

Метод 1. Запишем выражение для завершающего события через элементарные события, т. е.

$$T_0 = T_1 + T_2.$$

Поскольку $T_2 = CD$, $T_1 = T_3E$, $T_3 = A + B$, то $T_0 = E(A + B) + CD$, и, следовательно,

$$P(T_0) = P(EA + EB + CD).$$

Раскрывая данное выражение, можно получить формулу для вероятности появления завершающего события. При допущении о

статистической независимости событий (отказов) можно найти количественную оценку вероятности появления завершающего события.

Метод 2 – метод определения численного значения вероятности появления завершающего события основан на вычислении вероятностей появления промежуточных событий. В данном случае предполагается, что события (отказы) статистически независимы. Используя правило умножения вероятностей, получаем следующие количественные результаты для вероятностей появления промежуточных событий и завершающего события:

$$P(T_3) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) = 1/5 + 1/5 - 1/25 = 9/25,$$

$$P(T_2) = P(C)P(D) = 1/5 \cdot 1/5 = 1/25,$$

$$P(T_1) = P(T_3)P(E) = 9/25 \cdot 1/5 = 9/125,$$

$$P(T_0) = P(T_1) + P(T_2) - P(T_1)P(T_2) = 9/125 + 1/25 - 9/125 \cdot 1/25 = 341/3125.$$

Пример 9. Допустим, что в дереве неисправностей, изображенном на рис. 17, событие E заменяется событием D (рис. 18). Для получения вероятности появления завершающего события нового дерева, изображенного на рис. 7.18, применим *метод 1* из предыдущего примера. Выражение, связывающее завершающее событие с основными событиями (включая повторяющееся событие D), имеет вид

$$T_0 = (A + B)D + CD \quad \text{или} \quad T_0 = DA + BD + CD.$$

Вероятность появления завершающего события определяется по формуле

$$P(DA + BD + CD) = P(DA) + P(BD) + P(CD) - P(DABD) - P(DACD) - P(BDCD) + P(DABDCD).$$

В случае неповторяющихся статистически независимых событий

$$P(DA + BD + CD) = P(A)P(D) + P(B)P(D) + P(C)P(D) - P(D)P(A)P(B) - P(A)P(C)P(D) - P(B)P(C)P(D) + P(A)P(B)P(C)P(D).$$

Следовательно, вероятность появления завершающего события равна

$$P(DA + BD + CD) = 1/25 + 1/25 + 1/25 - 1/125 - 1/125 - 1/125 + 1/625 = 61/625.$$

Однако, если вначале исключаются повторяющиеся события, то дерево неисправностей, представленное на рис. 18, приводится к дереву, показанному на рис. 19. Выражение для завершающего события этого дерева неисправностей принимает вид

$$T_0 = DT_1, \quad \text{где} \quad T_1 = A + B + C.$$

В случае статистически независимых событий вероятность появления завершающего события равна

$P(DT_1) = P(D)P(T_1) = 1/5 \cdot 61/625 = 61/3125$,
 где $P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A)P(B) - P(A)P(C) - P(B)P(C) + P(A)P(B)P(C) = 61/625$.

Заметим, что, если вероятности появления элементарных отказов очень малы, существование зависимости событий не вносит большой погрешности в конечный результат. Однако прежде чем находить окончательное значение вероятности, необходимо попытаться исключить все случаи зависимости событий в дереве неисправностей.

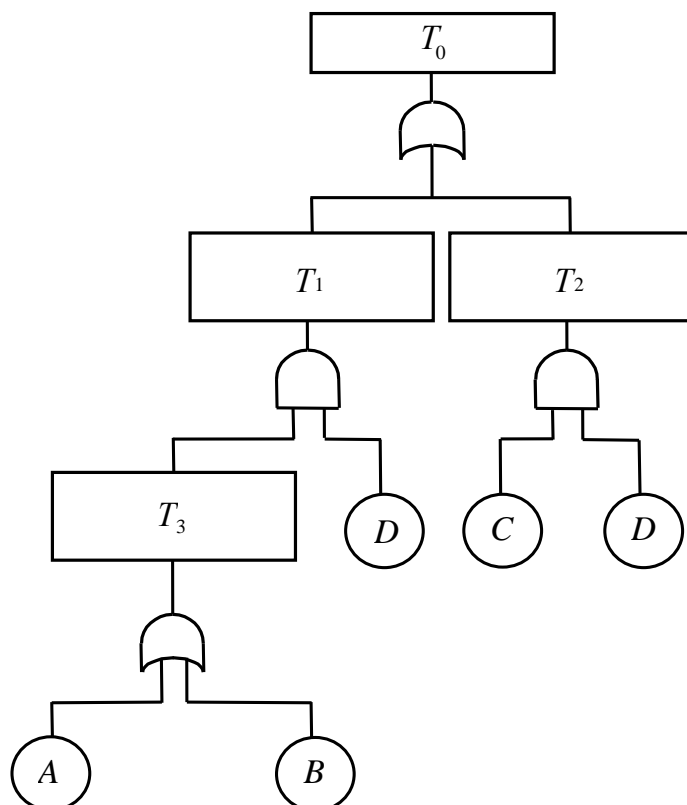


Рис. 18. Дерево неисправностей в случае повторяющегося события

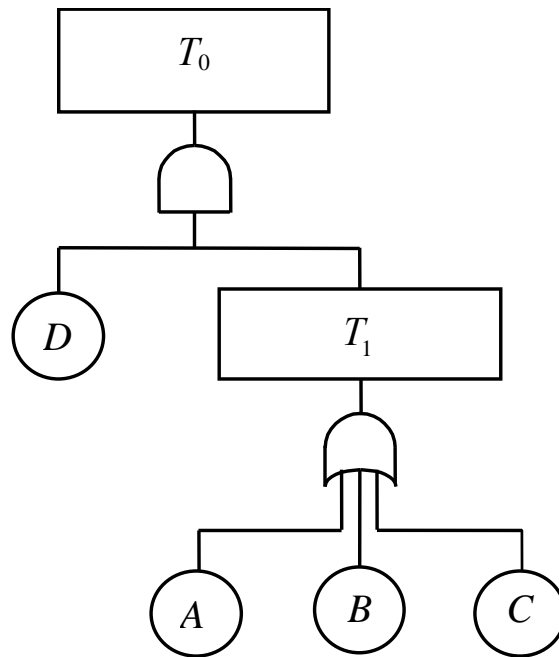


Рис. 19. Дерево неисправностей при отсутствии повторяющихся событий

Преимущества и недостатки метода дерева отказов

Данный метод, как и любой другой, обладает определенными достоинствами и недостатками. Так, например, метод дает полное представление о поведении технической системы, но требует от специалистов по надежности глубокого понимания работы технической системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа; помогает дедуктивно выявлять отказы; дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и анализа компромиссных решений; позволяет выполнять количественный и качественный анализы надежности; облегчает анализ надежности сложных систем. Вместе с тем реализация метода требует значительных затрат средств и времени. Кроме того, полученные результаты трудно проверить; трудно учесть состояния частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа. Существенные трудности возникают и при получении в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов.

Контрольные вопросы

1. Какие символы используются при построении деревьев событий и деревьев отказов?
2. В чем состоит процедура построения дерева отказов?
3. В чем заключается сущность метода первичных отказов?
4. В чем заключается сущность метода вторичных отказов?
5. В чем заключается сущность метода инициированных отказов?
6. Что такое «минимальное сечение дерева неисправностей»?
7. Как проводится количественная оценка дерева отказов?
8. Каковы преимущества и недостатки метода дерева отказов?