

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Владимирский государственный университет имени  
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

Кафедра «Автотранспортная и техносферная безопасность»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ»

Составитель:  
Е.А. Киндеев

Владимир 2016

УДК 614.8  
ББК 20.3я73.

Рецензент

Начальник Бюро мониторинга и анализа качества  
ОАО «Владимирское КБ радиосвязи» Киндеева Т. В.

Учебное пособие к курсу лекций по дисциплине «Управление рисками»/Сост. Е.А. Киндеев, Владим. гос. ун-т., Владимир, 2016. – 170 с.

Подготовлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Управление рисками», содержит материал для подготовки к экзамену.

Предназначено для студентов направления 20.03.01 «Техносферная безопасность», профиля «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых.

Илл. 24, Табл. 6, Библиогр. 4 назв.

УДК 614.8  
ББК 20.3я73.

© Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ)

## **АННОТАЦИЯ**

Содержание учебного пособия соответствует образовательному стандарту по дисциплине «Управление рисками» для направления 20.03.01 «Техносферная безопасность». Учебное пособие также может быть использовано студентами направления 20.03.01 «Техносферная безопасность» при изучении дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск».

## ВВЕДЕНИЕ

С момента возникновения и особенно за последние 40 лет теория рисков получила значительное развитие, став научной дисциплиной. Особенно значительны ее достижения в следующих приложениях:

экономика, в частности страховой и финансовый риск-менеджмент. Подтверждением служит не только развитость страхового рынка, но и множество появившихся с начала 70-х гг. XX в. (как реакция на возрастание нестабильности мировой экономики) финансовых инструментов, направленных на снижение финансовых рисков;

техносфера, особенно обеспечение безопасности таких потенциально опасных объектов, как ядерные реакторы. Подтверждением является переход к законодательному регулированию техногенной безопасности (например, принятие Федеральных законов «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ и «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ), которое обычно начинается лишь после достаточной научной проработки соответствующих вопросов.

Управление риском стало объективно необходимым во многих ключевых сферах деятельности, определяющих современную цивилизацию. Проблемы рисков все шире рассматриваются и в учебных дисциплинах, касающихся обеспечения конкретных видов безопасности (природной, техногенной, промышленной, безопасности в ЧС, безопасности жизнедеятельности, экономической, экологической, национальной).

В изданной за последние годы учебной и научной литературе по безопасности и рискам наблюдается определенная предметная направленность: философско-социологическая; экономическая, экологическая; риски в природно-техногенной сфере, в частности, риски чрезвычайных ситуаций; риски в социально-политической сфере. Однако вопросы анализа и управления рисками излагаются с различных и зачастую противоречивых позиций. Это приводит к тому, что даже в нормативных правовых документах наблюдаются досадные неточности, связанные с непониманием сущности риска, способов его оценки и представления. Поэтому очевидна потребность в общеметодологической литературе по анализу и управлению рисками.

# 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РИСКА

## 1.1. Понятие риска

*Риск* – это количественная оценка опасности, которая численно равна вероятности нежелательного с точки зрения безопасности события. Применительно к проблеме безопасности жизнедеятельности таким событием может быть ухудшение здоровья или смерть человека, авария или техногенная катастрофа, опасное природное явление, загрязнение окружающей среды, разрушение экологической системы, гибель группы людей или возрастание смертности населения, увеличение социальной напряженности, материальный ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличения затрат на безопасность.

Под термином «*ущерб*» понимают фактические и вероятные экономические потери и (или) ухудшение состояния природной среды вследствие изменений в окружающей человека среде.

*Степень риска* представляет собой двухкомпонентную величину, которая характеризуется ущербом от воздействия конкретного опасного фактора и вероятностью его возникновения. Численно степень риска равна произведению вероятности нежелательного с точки зрения безопасности события на ущерб, наносимый этим событием.

*Фактор риска* – это событие, явление или процесс, который непосредственно не наносит какого-либо вреда, но увеличивает вероятность возникновения неблагоприятного с точки зрения безопасности события.

Аналитически риск выражает частоту реализации опасностей по отношению к возможному их числу. В общем виде

$$R = \frac{N(t)}{Q(f)}, \quad (1.1)$$

где  $R$  – риск;

$N$  – количественный показатель числа нежелательных событий в единицу времени  $t$ ;

$Q$  – число объектов, подверженных определенному фактору риска  $f$ .

Понятие «*риск*» включает в себя еще один аспект – это количественная характеристика действия опасностей, формируемых конкретной деятельностью человека. Например, количество смертельных случаев, количество случаев заболевания, количество случаев временной и постоянной нетрудоспособности (инвалидности), вызванной действием на

человека какого-либо опасного фактора (электрический ток, вредное вещество, двигающийся предмет и др.), отнесенных на определенное количество жителей (работников) за конкретный период времени. Значение риска для конкретного опасного фактора можно получить из статистики несчастных случаев, случаев заболевания и так далее за различные промежутки времени: смена, сутки, неделя, квартал, год.

Вероятность возникновения опасности (риск) – величина, существенно меньшая единицы. Кроме того, область возможной реализации опасности распространена в пространстве и времени. В терминах риска принято описывать и опасности от достоверных событий, происходящих с вероятностью, равной единице, например загрязнение окружающей среды отходами конкретного промышленного предприятия. В этом случае “риск” эквивалентен ущербу и величина риска равна величине ущерба.

Таким образом, количественная оценка риска представляет собой процесс оценки численных значений вероятности и последствий нежелательных процессов, явлений, событий.

Опасности могут реализоваться в форме травм, заболеваний или гибели человека только в том случае, если область формирования опасностей (ноксосфера) пересекается с областью, в которой возможно пребывание человека (гомосфера). В производственных условиях – это источник опасности (один из элементов производственной среды) и рабочая зона (см. рис. 1.1).

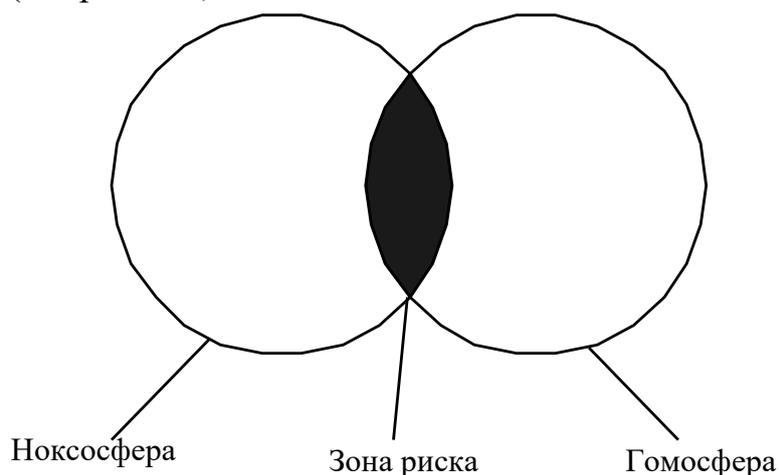


Рис. 1.1. Область действия опасности на человека

Общий риск для людей выражается двумя категориями:

- индивидуальный риск, который определяется как вероятность того, что человек испытает определенное воздействие в ходе своей деятельности;

- социальный риск, который определяется как соотношение между количеством людей, погибших в одной аварии, и вероятностью этой аварии.

В производственных условиях различают индивидуальный и коллективный риск.

Индивидуальный риск характеризует реализацию опасности определенного вида деятельности для конкретного индивидуума - производственный травматизм и профессиональная заболеваемость, частота несчастных случаев и профессиональных заболеваний.

Коллективный риск – это вероятность травмирования или гибели двух и более человек от воздействия опасных и вредных производственных факторов.

Как известно, основная аксиома безопасности утверждает, что абсолютная безопасность невозможна, т.е. вероятность гибели человека ни при каких условиях не может быть равна нулю. Поэтому наименьшим уровнем риска принято считать приемлемый риск. Современное общество стоит на эгоцентрических позициях, считается, что человеческая жизнь бесценна. Но в реальном мире за всё приходится платить, в том числе и за безопасность. Реально существует грань, за которой затраты на достижение более высокого уровня безопасности воспринимаются обществом и отдельными людьми как чрезмерные. Так, например, риск гибели человека в дорожно-транспортном происшествии в 2014 году в Российской Федерации составил  $1,85 \cdot 10^{-4}$  (по официальным данным ГИБДД), а в Германии  $5 \cdot 10^{-5}$ . Показатели отличаются примерно в 27 раз. При этом, климатические условия, автомобили, правила дорожного движения и люди в этих странах вполне сопоставимы и не объясняют такого различия. Очевидно, причины следует искать в организации дорожного движения, а, следовательно, в расходах на безопасность дорожного движения, которые в этих странах принято считать достаточными.

Приемлемый риск – это вероятность гибели человека, с которой общество на данном этапе своего развития готово примириться и на снижение которого оно не готово тратить дополнительные средства. Это

некий оптимальный уровень, при котором затраты на безопасность и тяжесть последствий от воздействия данного опасного фактора уравниваются друг друга по мнению тех, кто имеет реальную власть в данном конкретном обществе людей.

Использование риска в качестве единого показателя вреда при оценке действия различных опасных и вредных факторов на человека применяется для обоснованного сравнения безопасности различных отраслей экономики и типов работ, аргументации социальных преимуществ и льгот для определенной категории лиц и т.д.

Классификация источников опасности и уровни риска гибели человека от их воздействия представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Классификация источников и уровней риска смерти человека  
в промышленно развитых странах  
(R – количество смертельных случаев (человек в год))

| Источник                            | Причины   | Среднее значение  |
|-------------------------------------|---|---|
| Внутренняя среда организма человека | Генетические и соматические заболевания, старение   | $R_{cp} = 0,6 \dots 10^{-2}$  |
| Естественная среда обитания         | Несчастный случай из-за воздействия стихийных бедствий (землетрясения, ураганы, наводнения и др.)   | общий $R_{cp} = 10^{-5}$ :<br>- наводнения $4 \cdot 10^{-6}$ ;<br>- землетрясения $3 \cdot 10^{-6}$ ;<br>- грозы $6 \cdot 10^{-7}$ ;<br>- ураганы $3 \cdot 10^{-8}$             |
| Техносфера                          | Несчастные случаи; заболевания, вызванные загрязнением окружающей среды                             | $R_{cp} = 10^{-4} \dots 10^{-6}$  |
| Профессиональная деятельность       | Профессиональные заболевания, несчастные случаи на производстве (при профессиональной деятельности) | - безопасная $R_{cp} < 10^{-4}$ ;<br>- относительно безопасная $R_{cp} = 10^{-4} - 10^{-3}$ ;<br>- опасная $R_{cp} = 10^{-3} - 10^{-2}$ ;<br>- особо опасная $R_{cp} > 10^{-2}$ |
| Социальная среда                    | Самоубийства, преступления, военные действия.   | $R_{cp} = (0,5 - 1,5) \cdot 10^{-4}$  |

Величина риска является не только оценкой безопасности в какой-то одной отрасли промышленности, но и для оценки изменения уровня безопасности со временем и при различных условиях труда, для количественного установления диапазона риска по всей промышленности в целом.

Ожидаемый (прогнозируемый) риск  $R$  – это произведение частоты реализации конкретной опасности  $f$  на произведение вероятностей нахождения человека в «зоне риска» при различном регламенте технологического процесса:

$$R = f \prod_i^n p_i, \quad (1.2)$$

где  $f$  – число несчастных случаев (смертельных исходов) от данной опасности чел/год (для отечественной практики  $f = K_{\text{ч}} \cdot 10^{-3}$ , т.е. соответствует значению коэффициента частоты несчастного случая  $K_{\text{ч}}$ , деленного на 1000);

$\prod_i^n p_i$  – произведение вероятностей нахождения работника в «зоне риска» для каждого  $i$ -го фактора.

Использование формулы (1.2) для оценки вероятности производственного риска удобно тем, что позволяет определять величины рисков воздействия различных негативных факторов для конкретного технологического процесса производства, проводить оценку значимости каждого фактора с позиции безопасности.

## 1.2. Классификация видов риска

В зависимости от факторов риска и объектов риска различают индивидуальный, техногенный, экологический, социальный и экономический риск.

*Индивидуальный риск* - это вероятность реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций для одного человека. Его можно определить как отношение количества людей, погибших от реализации фактора риска к общему количеству людей, подвергавшихся воздействию данного фактора за определенный период времени:

$$R_u = \frac{P(t)}{L(f)}, \quad (1.3)$$

где  $R_{и}$  – индивидуальный риск;

$P$  – число пострадавших (погибших) в единицу времени  $t$  от  
определенного фактора риска  $f$ ;

$L$  – число людей, подверженных соответствующему фактору риска в  
единицу времени  $t$ .

Источником индивидуального риска в производственной сфере является профессиональная деятельность, а наиболее распространенным фактором риска - опасные и вредные производственные факторы.

*Технический риск* выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений:

$$R_r = \frac{\Delta T(t)}{T(f)}, \quad (1.4)$$

где  $R_r$  – технический риск;

$\Delta T$  – число аварий в единицу времени  $t$  на идентичных технических системах и объектах;

$T$  – число идентичных технических систем и объектов,  
подверженных общему фактору риска  $f$ .

Наиболее распространенные факторы технического риска: ошибочный выбор по критериям безопасности направлений развития техники и технологий; выбор потенциально опасных конструктивных схем и принципов действия технических систем; ошибки в определении эксплуатационных нагрузок; неправильный выбор конструкционных материалов; недостаточный запас прочности; отсутствие в проектах технических средств безопасности; некачественная доводка конструкции, технологии, документации по критериям безопасности; отклонения от заданного химического состава конструкционных материалов; недостаточная точность конструктивных размеров; нарушение режимов термической и химико-термической обработки деталей; нарушение регламентов сборки и монтажа конструкций и машин; использование техники не по назначению; нарушение паспортных (проектных) режимов эксплуатации; несвоевременные профилактические осмотры и ремонты; нарушение требований транспортирования и хранения.

*Экологический риск* – это возможность появления неустранимых нарушений в состоянии окружающей среды: загрязнение местности

вредными производственными отходами, изменение климатических особенностей территории (например, опустынивание или заболачивание земель), радиоактивное загрязнение, кислотные осадки и т.д. С точки зрения количественной оценки понятие “экологический риск” может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба от воздействия вредного экологического фактора за определённый интервал времени к нормированной величине интенсивности этого фактора. Под возможным ущербом прежде всего имеется в виду здоровье человека.

Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия. Нежелательные события экологического риска могут проявляться как непосредственно в зонах вмешательства, так и за их пределами:

$$R_o = \frac{\Delta O(t)}{O}, \quad (1.5)$$

где  $R_o$  – экологический риск;

$\Delta O$  – число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий в единицу времени  $t$ ;

$O$  – число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории.

Масштабы экологического риска  $R_o^m$  оцениваются процентным соотношением площади кризисных или катастрофических территорий  $\Delta S$  к общей площади рассматриваемого биогеоценоза  $S$ :

$$R_o^m = \frac{\Delta S}{S} 100. \quad (1.6)$$

В современных условиях основным источником экологического риска является техногенное влияние на окружающую природную среду, а наиболее распространенными факторами экологического риска - загрязнение водоемов, атмосферного воздуха вредными веществами, почвы отходами производства; изменение газового состава воздуха; энергетическое загрязнение биосферы.

*Социальный риск* характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений и

преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу – это риск для группы или сообщества людей. Оценить его можно, например, по динамике смертности, рассчитанной на 1000 человек соответствующей группы:

$$R_c = \frac{1000(C_2 - C_1)}{L}(t), \quad (1.7)$$

где  $R_c$  – социальный риск;

$C_1$  – число умерших в единицу времени  $t$  (смертность) в исследуемой группе в начале периода наблюдения до развития чрезвычайных событий;

$C_2$  – смертность в той же группе людей в конце периода наблюдения, например на стадии затухания чрезвычайной ситуации;

$L$  – общая численность исследуемой группы.

*Экономический риск* определяется соотношением пользы и вреда, получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности:

$$R_s = \frac{B}{П} 100, \quad (1.8)$$

где  $R_s$  – экономический риск, %;

$B$  – вред обществу от рассматриваемого вида деятельности;

$П$  – польза.

Использование рассматриваемых видов риска позволяет найти оптимальные решения по обеспечению безопасности и на уровне отдельного предприятия и в более крупных масштабах.

### **1.3. Методология анализа и оценки риска**

Методологическое обеспечение анализа риска представляет собой совокупность методов, методик и программных средств, позволяющих всесторонне выявить опасности и оценить риск чрезвычайной ситуации. При решении комплексных вопросов безопасности широко применяется методология риска, которая основана на определении вероятности нежелательных событий и тяжести их последствий. Используя количественные показатели риска можно оценивать потенциальную опасность и сравнивать опасности различной природы. При этом в

качестве показателей опасности чаще всего понимают индивидуальный или социальный риск гибели людей или риск причинения ущерба.

Анализ риска является неотъемлемой частью системного подхода к принятию политических решений и практических мер при решении задач предупреждения или уменьшения опасности для жизни человека, ущерба имуществу и окружающей среде, называемого *управление риском*.

*Оценка риска* – это анализ происхождения (возникновения) и масштабов риска в конкретной ситуации.

*Степень риска* рассматривается как произведение вероятности возникновения конкретного опасного события и величины ущерба от его последствий. Степень риска можно представить как математическое ожидание величины ущерба от нежелательного события:

$$R(m) = \sum_{i=1}^n p_i m_i, \quad (1.9)$$

где  $p_i$  – вероятность наступления события, связанного с ущербом;

$m_i$  – величина ущерба, причинённого экономике.

Так как вероятность наступления неблагоприятного события – величина безразмерная, а ущерб измеряется в денежных единицах (в рублях), то степень риска также имеет размерность денежных единиц, что удобно при принятии управленческих решений.

Значение индивидуального риска используется для количественной оценки потенциальной опасности на конкретном рабочем месте или для определенного вида деятельности.

Значение социального риска применяется для интегральной количественной оценки опасных производственных объектов и характеристики масштаба воздействия аварии.

Можно выделить три общие составляющие процесса управления риском: сбор информации о текущем состоянии производственной безопасности, анализ риска и контроль производственной безопасности. Анализ риска базируется на собранной информации и определяет меры по контролю безопасности, поэтому основной задачей анализа риска является обоснование решений при управлении риском (рис. 1.2).

Анализ риска или риск-анализ – это систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных лиц или групп населения, имущества или окружающей среды.

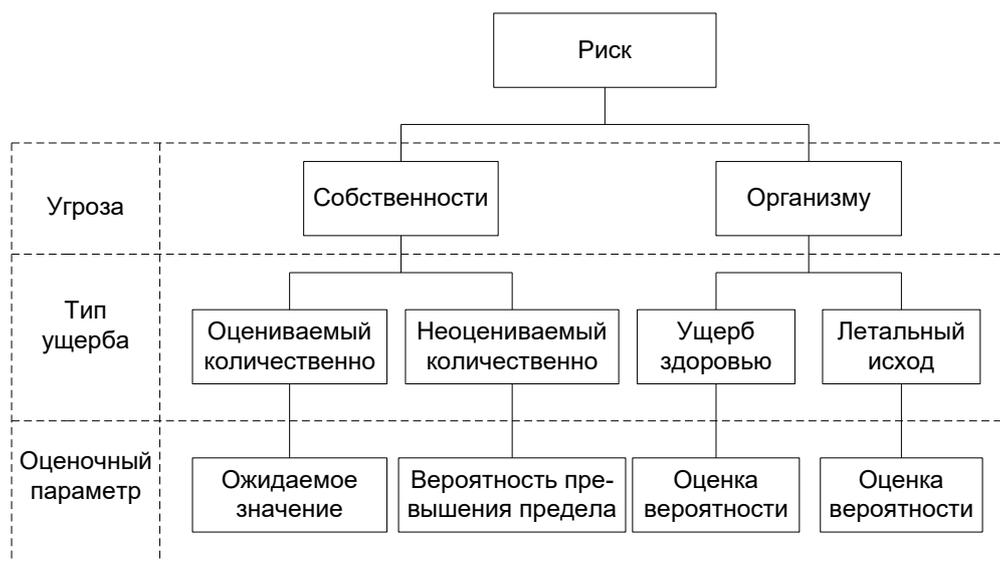


Рис.1.2. Схема анализа риска

Анализ риска заключается в выявлении опасностей и оценке степени риска. При этом под опасностью понимается источник потенциального ущерба или вреда (или ситуация с возможностью нанесения ущерба), а под идентификацией опасности – процесс выявления и признания, что опасность существует, и определение ее характеристик.

Оценка риска включает в себя анализ частоты возникновения нежелательных с точки зрения безопасности событий и анализ последствий этих событий.

Анализ риска проводится по следующей схеме:

1. Планирование и организация проведения анализа риска;
2. Идентификация опасностей;
  - 2.1. Выявление опасностей;
  - 2.2. Предварительная оценка характеристик опасностей;
3. Оценка риска;
  - 3.1. Анализ частоты возникновения опасных событий;
  - 3.2. Анализ последствий этих событий;
  - 3.3. Анализ неопределенностей при анализе риска;
4. Разработка рекомендаций по управлению риском.

Применяемые методы (методики) должны удовлетворять следующим требованиям:

- соответствие рассматриваемой технической системе;
- они должны основываться на принципах и критериях, установленных в действующей нормативно-технической документации;
- полученные результаты должны способствовать наилучшему пониманию характера опасности, позволять выявить наиболее «слабые» места и процессы в системе функционирования объекта и наметить оптимальные пути управления риском.

### **Последовательность проведения анализа риска.**

**1. Планирование и организация работ.** На этом этапе необходимо:

- указать причины, вызвавшие необходимость проведения анализа риска;
- идентифицировать и описать анализируемую техническую систему;
- подобрать команду исполнителей, привлекаемых для проведения анализа риска;
- установить рабочие источники информации о безопасности системы;
- определить исходные данные для анализа риска;
- проанализировать неопределенности анализа риска;
- определить цели анализа риска и критерии приемлемого риска.

**2. Идентификация опасностей.** Основная задача – на основе собранной информации об объекте и опыта работы подобных систем выявить все присущие данной технической системе опасности. На этом же этапе проводится предварительная оценка опасностей с целью выбора одного из трех направлений деятельности:

- а) в случае незначительности выявленных опасностей прекратить дальнейший анализ;
- б) при значительной неопределенности выявленных опасностей провести более детальный предварительный анализ риска;
- в) выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

В первом случае процесс анализа риска может заканчиваться уже на этапе идентификации опасностей.

**3. Оценка риска.** Из всех идентифицированных опасностей необходимо выбрать опасности с неприемлемым уровнем риска. При этом критерии приемлемого риска и результаты оценки риска могут быть выражены качественно (в виде текстового описания) или количественно (например, в виде количества несчастных случаев или аварий в год).

Оценка риска включает в себя анализ вероятности возникновения опасного события и анализ тяжести последствий этих событий. Однако, когда тяжесть последствий незначительна или событие крайне маловероятно, достаточно оценить один параметр. Для анализа частоты обычно используются:

- исторические данные по соответствующим типам технических систем или видам деятельности;
- статистические данные по аварийности и надежности оборудования;
- логические методы анализа «деревьев событий» или «деревьев отказов»;
- экспертная оценка с учетом мнения специалистов в данной области.

Анализ тяжести последствий включает в себя оценку воздействия на людей, имущество или окружающую среду. Для прогнозирования последствий необходимо понимать суть происходящих аварийных процессов, действующих поражающих факторов и оценить степень поражения изучаемых объектов воздействия.

В ходе проведения оценки риска следует проанализировать возможную неопределенность результатов, вызванную неточностью информации по надежности оборудования и ошибками персонала, а также принятыми допущениями в применяемых при расчете моделях аварийного процесса. Анализ неопределенности – это оценка неопределенности результатов оценки риска, вызванной неопределенностью исходных данных и точностью использованных моделей.

Следует подчеркнуть, что часто сложные и дорогостоящие расчеты дают значение риска, точность которого очень невелика.

Качественные (инженерные) методы анализа риска позволяют достигать основных целей анализа риска при использовании меньшего объема информации и затрат труда. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях – и

единственно возможны, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных сложных технических систем.

**4. Разработка рекомендаций по управлению риском.** Существующий риск может быть признан приемлемым, в противном случае необходимо указать меры по уменьшению риска. Меры по управлению риском могут иметь технический, эксплуатационный или организационный характер.

Следует заметить, что иногда могут происходить события, считавшиеся ранее чрезвычайно маловероятными. Тяжесть последствий таких событий может быть очень велика. Например, катастрофа океанского лайнера «Титаник» или авария на японской атомной электростанции «Фукусима». В обоих случаях произошли природные катаклизмы, ранее никогда не наблюдавшиеся и считавшиеся невероятными. Технические системы попали в условия эксплуатации, при которых их функционирование стало невозможно.

#### **1.4. Качественные методы анализа риска**

Существуют следующие методы идентификации возможных опасностей:

1. **Инженерные методы.** На основе собранных статистических данных проводится вероятностный анализ опасностей, производится построение деревьев опасности.

2. **Модельные методы.** По накопленным исходным данным и результатам наблюдений строят модели воздействия вредных и опасных факторов на отдельного человека, на профессиональные и социальные группы населения.

3. **Экспертные методы.** Производится оценка вероятностей опасных событий опросом экспертов в данной области науки, техники или технологий.

4. **Социологические методы.** Определяются вероятности опасных событий путем опроса населения.

Для более точной и достоверной оценки риска эти методы применяют совместно.

Качественные методы анализа опасностей позволяют определить источники возникновения опасностей, возможные аварии или несчастные

случаи, разработать мероприятия для предотвращения опасных событий и для снижения тяжести их последствий.

Перед проведением качественного анализа необходимо идентифицировать источники опасностей. Для этого собирают исходные данные и проводят предварительный анализ опасностей.

При анализе опасностей выбор определенного качественного метода зависит от цели анализа и особенностей технической системы. Существуют следующие качественные методы анализа опасностей:

- предварительный анализ опасностей;
- анализ последствий отказов;
- анализ опасностей с помощью «дерева причин»;
- анализ опасностей с помощью «дерева последствий»;
- анализ опасностей методом потенциальных отклонений;
- анализ ошибок персонала;
- причинно-следственный анализ.

*Предварительный анализ опасностей* (ПАО) заключается в выявлении источника опасностей, определении причин возникновения опасных состояний и характеристике опасностей в зависимости от вызываемых ими последствий.

Порядок осуществления предварительного анализа опасностей:

1. Определение технических характеристик технической системы, процесса, используемых источников энергии, материалов и их повреждающих свойств.
2. Поиск нормативно-технической документации, действие которой распространяется на данную техническую систему или процесс.
3. Осуществляют проверку используемой технической документации на ее соответствие нормам и правилам безопасности.
4. Составляют перечень опасностей, в котором указывают идентифицированные источники опасностей, возможные поражающие факторы, ход протекания потенциальных аварий и другие выявленные недостатки.

В ходе ПАО производится первая попытка выявить потенциально опасные части технической системы и отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Этот анализ выполняется на

начальном этапе разработки системы. Детальный анализ возможных событий обычно проводится после того как система полностью определена с помощью дерева отказов.

*Анализ последствий отказов (АПО)* – качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе, позволяющий сделать определенные прогнозы. АПО 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 выявляется их результирующее воздействие на систему.

Изучение отдельных аварийных ситуаций и отказов элементов позволяют определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом. АПО осуществляют в следующем порядке:

1. Техническую систему подразделяют на составляющие компоненты.
2. Для каждого составляющего систему компонента выявляют все возможные отказы.
3. Изучают все потенциальные аварии, которые могут быть вызваны отказами компонентов исследуемого объекта.
4. Отказы ранжируют по степени опасности и разрабатывают меры, позволяющие избежать возникновение этих отказов.

При помощи АПО можно оценить потенциальную опасность любого технического объекта.

*Анализ опасностей с помощью «дерева причин»* потенциальной аварии (АОДП) позволяет выявить комбинации отказов оборудования, ошибок персонала и внешних воздействий, приводящих к аварийной ситуации (основному событию). АОДП выполняют в следующем порядке:

1. выбирают возможное событие - аварию или отказ, который может привести к аварии;
2. выявляют факторы, которые могут привести к заданной аварии;
3. строят ориентированный граф-«дерево», вершина (корень) которого является потенциальной аварией.

Проведение анализа с помощью дерева причин возможно только после детального изучения рабочих функций всех компонентов

рассматриваемой технической системы. На работу системы оказывает влияние человеческий фактор, например, возможность совершения оператором ошибки. Поэтому желательно все потенциальные инциденты - "отказы операторов" вводить в содержание дерева причин-отказов. Дерево отражает статический характер событий. Построением нескольких деревьев можно отразить их динамику, т. е. развитие событий во времени. Для определения последовательности событий при аварии, включающей сложные взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности, используется дерево событий.

*Анализ опасностей с помощью «дерева последствий»* потенциальной аварии (АОДПО) отличается от АОДП тем, что в этом случае задается критическое событие – инициатор, и исследуют всю группу событий – последствий, к которым оно может привести. Анализ причин последствий 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. Процедура построения диаграммы - дерева последствий состоит из выбора первого инициирующего события, за которым следуют другие события, определенные на данном этапе работы.

При анализе «причин - последствий» используются комбинированные методы «дерева отказов» (выявить причины) и «дерева событий» (показать последствия), причем все явления рассматриваются в естественной последовательности их появления.

*Анализ опасностей методом потенциальных отклонений* (АОМПО) включает процедуру искусственного создания отклонений с помощью ключевых слов. Для этого разбивают технологический процесс или техническую систему на составные части и, создавая с помощью ключевых слов отклонения, систематично изучают их потенциальные причины и те последствия, к которым они могут привести на практике.

*Анализ ошибок персонала* (АОП) является одним из важнейших элементов методологии оценки опасностей и позволяет учесть воздействие человеческого фактора, т.е. учесть как ошибки, инициирующие или усугубляющие аварийную ситуацию, так и способность персонала совершать корректирующие действия по управлению аварией.

АОП включает следующие этапы:

1. выбор системы и вида работы;
2. определение цели;
3. идентификация вида потенциальной ошибки;
4. идентификация последствий;
5. идентификация возможности исправления ошибки;
6. идентификация причины ошибки;
7. выбор метода предотвращения ошибки;
8. оценка вероятности ошибки;
9. оценка вероятности исправления ошибки;
10. расчет риска;
11. выбор путей снижения риска.

*Причинно-следственный анализ (ПСА)* выявляет причины происшедшей аварии или катастрофы и является составной частью общего анализа опасностей. Он завершается прогнозом новых аварий и составлением плана мероприятий по их предупреждению. ПСА включает следующие этапы:

1. Точное и объективное описание аварии.
2. Определение событий, предшествовавших аварии.
3. Построение ориентированного графа – «дерева причин», начиная с последней стадии развития событий, т.е. с самой аварии;
4. Выявление логических связей «дерева причин»;
5. Разработка предупредительных мер для исключения повторения аналогичных аварий.

### **1.5. Количественная оценка риска**

Количественный анализ опасностей дает возможность рассчитать вероятности возникновения опасных событий и тяжесть последствий этих событий. Для проведения количественного анализа применяются статистический анализ и различные методы расчета вероятностей.

Для удобства расчетов сложные системы разбивают на подсистемы. *Подсистемой* называют часть системы, которую выделяют по определенному признаку, отвечающему конкретным целям и задачам функционирования системы. Подсистема может рассматриваться как самостоятельная система, состоящая из других подсистем, т.е.

иерархическая структура сложной системы может состоять из подсистем различных уровней, где подсистемы низших уровней входят составными частями в подсистемы высших уровней. В свою очередь, подсистемы состоят из *компонентов* – частей системы, которые рассматриваются без дальнейшего деления как единое целое.

Логический анализ внутренней структуры системы и определение вероятности нежелательных событий как функции отдельных составляющих событий являются одной из задач анализа опасностей.

*Подсистемой «И»* называют ту часть системы, компоненты которой соединены параллельно. К отказу такой подсистемы приводит отказ всех ее компонентов.

Если отказы компонентов можно считать взаимно независимыми, то вероятность отказа в подсистеме «И»

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (1.10)$$

где  $P(A)$  – вероятность события  $A$  (отказ всей подсистемы «И»);

$P(A_i)$  – вероятность отказа  $i$ -го компонента подсистемы «И»;

$n$  – общее количество компонентов подсистемы «И».

На практике создание подсистем «И» осуществляется дублированием или резервированием. Данный технический прием применяют в случае, если необходимо достичь высокой степени надежности системы, особенно в системах, обеспечивающих безопасность.

*Подсистемой «ИЛИ»* называют часть системы, компоненты которой соединены последовательно. К нежелательному событию в такой подсистеме приводит отказ любого компонента подсистемы.

Если отказы компонентов взаимно независимы, то вероятность отказа в подсистеме «ИЛИ»:

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(A_i)) \quad (1.11)$$

Для равновероятных отказов вероятность отказа в этой подсистеме:

$$P(A) = 1 - (1 - p)^n. \quad (1.12)$$

Это выражение свидетельствует о высокой вероятности отказа в сложных системах, даже состоящих из элементов с высокой надежностью. Например, при вероятности отказа компонента  $p = 0,05$  подсистема «ИЛИ», состоящая из 20 компонентов ( $n = 20$ ), имеет вероятность того, что отказа в подсистеме не произойдет, равную

$$(1 - p)^n = (1 - 0,05)^{20} \approx 0,358.$$

При анализе риска следует учитывать следующие аспекты:

1. Устройства, операции, действия персонала, которые с точки зрения безопасности выполняют одни и те же функции в системе, могут считаться соединенными параллельно.
2. Устройства, операции, действия персонала, каждое из которых необходимо для предотвращения опасного события, должны рассматриваться как соединенные последовательно.

На практике, зачастую подсистемы «И» или «ИЛИ» могут состоять из компонентов, в свою очередь соединенных в подсистемы «И» или «ИЛИ» в любых комбинациях.

Вероятность возникновения опасности – величина, существенно меньшая единицы. Кроме того, точки реализации опасности распределены в пространстве и времени. Это значит, что, например, вероятность пожара в одном здании населенного пункта гораздо выше, чем вероятность одновременного пожара всех зданий этого населенного пункта. Или вероятность пяти подряд очень холодных зим гораздо ниже одной очень холодной зимы.

Таким образом, чем больший отрезок времени или количество рискующих субъектов мы возьмем, тем определеннее станет величина ущерба, который субъекты получают в совокупности за этот отрезок времени.

В терминах риска принято описывать и опасности от достоверных событий, происходящих с вероятностью, равной единице. Таким примером является загрязнение окружающей среды отходами конкретного промышленного предприятия. В этом случае “риск” эквивалентен степени риска и, соответственно, величина риска равна величине ущерба.

Обычно при оценке степени риска его характеризуют двумя величинами – вероятностью события  $P$  и последствиями  $X$ , которые в выражении математического ожидания выступают как сомножители:

$$R = P \cdot X. \quad (1.13)$$

По отношению к источникам опасностей оценка риска предусматривает разграничение нормального режима работы  $R_n$  и аварийных ситуаций  $R_{ав}$ :

$$R = R_n + R_{ав} = P_n \cdot X_n + P_{ав} \cdot X_{ав}. \quad (1.14)$$

В случае, когда последствия неизвестны, то под риском понимают вероятность наступления определенного сочетания нежелательных событий:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1.15)$$

При необходимости можно использовать определение риска как вероятности превышения предела  $x$ :

$$R = P\{\xi > x\}, \quad (1.16)$$

где  $\xi$  - случайная величина.

Техногенный риск оценивают по формуле, включающей вероятность нежелательного события и величину последствий в виде ущерба  $U$ :

$$R = P \cdot U. \quad (1.17)$$

Если каждому нежелательному событию, происходящему с вероятностью  $P_i$ , соответствует ущерб  $U_i$ , то величина риска будет представлять собой ожидаемую величину ущерба  $U^*$ :

$$R = U^* = \sum_{i=1}^n P_i \cdot U_i \quad (1.18)$$

Если все вероятности наступления нежелательного события одинаковы ( $P_i = P, i=1, \dots, n$ ), то

$$R = P \cdot \sum_{i=1}^n U_i \quad (1.19)$$

Когда существует опасность здоровью и материальным ценностям, риск целесообразно представлять в векторном виде с различными единицами измерения по координатным осям:

$$\vec{R} = \vec{U} \cdot \vec{P} \quad (1.20)$$

Перемножение в правой части этого уравнения производится покомпонентно, что позволяет сравнивать риски.

Индивидуальный риск можно определить как ожидаемое значение причиняемого ущерба  $U^*$  за интервал времени  $T$  и отнесенное к группе людей численностью  $M$  человек:

$$R = U^*/(MT). \quad (1.21)$$

Общий риск для группы людей (коллективный риск)

$$R = U^*/T. \quad (1.22)$$

Пример 1.1. Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из 3-х подсистем, с независимыми отказами. Вероятности отказов подсистем:  $P_1 = 10^{-3}$ ,  $P_2 = 10^{-4}$ ,  $P_3 = 10^{-2}$ , ожидаемые ущербы от отказов подсистем  $U_1 = 10^6$  руб.,  $U_2 = 5 \cdot 10^6$  руб.,  $U_3 = 10^5$  руб.

Решение:

Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы как ожидаемую величину ущерба:

$$R = U = \sum_{i=1}^3 P_i \cdot U_i = P_1 U_1 + P_2 U_2 + P_3 U_3 = 10^{-3} \cdot 10^6 + 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^6 + 10^{-2} \cdot 10^5 = 2500 \text{ руб.}$$

Пример 1.2. Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из 5-и подсистем с независимыми равновероятными отказами  $P = 10^{-2}$ . Ожидаемые ущербы от отказов подсистем  $U_1 = 10^6$ ,  $U_2 = 10^7$ ,  $U_3 = 10^8$ ,  $U_4 = 10^9$ ,  $U_5 = 10^{10}$ .

Решение:

Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы с равновероятными отказами подсистем как ожидаемую величину ущерба:

$$R = U = P \cdot \sum_{i=1}^5 U_i = P(U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5) = 10^{-2} \cdot (1 + 10 + 10^2 + 10^3 + 10^4) \cdot 10^6 = 11\,110\,000 \text{ руб.}$$

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается разница между понятиями «риск» и «степень риска»?
2. Что такое «приемлемый риск»?
3. Какие виды риска можно выделить в зависимости от факторов риска и объектов риска?
4. С какой целью проводят анализ риска?
5. Какова последовательность проведения анализа риска?
6. С какой целью проводят оценку риска? Порядок проведения оценки риска.
7. Какие существуют качественные методы анализа опасностей? Каков порядок осуществления анализа опасностей качественными методами?
8. Для чего проводится количественный анализ опасностей?
9. По каким формулам подсчитывается вероятность отказа в подсистеме «И» и в подсистеме «ИЛИ»?
10. В каких случаях риск эквивалентен степени риска?

## 2. ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА

Возникновение и ход протекания промышленных аварий и техногенных катастроф, как правило, характеризуется 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* выявляются 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).

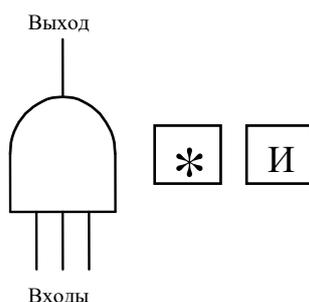
*Дерево событий* – последовательность событий, исходящих из основного (конечного) события (аварийная ситуация). Применяется для анализа развития аварийной ситуации.

### 2.1. Определения и символы, используемые при построении деревьев

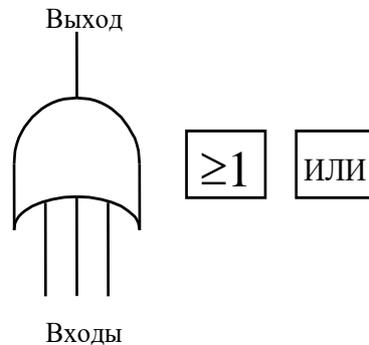
При построении деревьев отказов и деревьев событий принято использовать специальные символы и условные обозначения. Ниже приведены наиболее часто употребляемые из них:

1. *Схема И* (схема совпадения) - сигнал на выходе появляется только тогда, когда поступают все входные сигналы (умножение событий).

Для условного изображения схемы И применяются следующие символы:



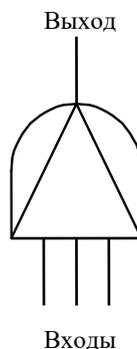
2. *Схема ИЛИ* (схема объединения) - сигнал на выходе появляется при поступлении на вход любого одного или большего числа сигналов (сумма событий). Для условного изображения схемы ИЛИ применяются следующие символы:



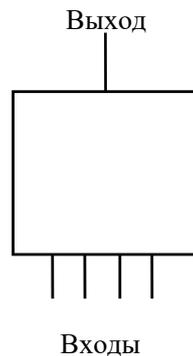
3. *Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ*: сигнал на выходе рассматривается как промежуточное событие и появляется при поступлении на вход одного и только одного входного сигнала. Для условного изображения этой схемы применяется следующий символ:



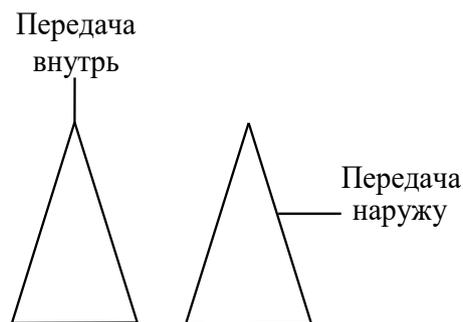
4. *Схема И с приоритетом*: логически эквивалентна схеме И, но входные сигналы должны поступать в определенном, заранее заданном порядке. Для условного изображения схемы И с приоритетом применяется следующий символ:



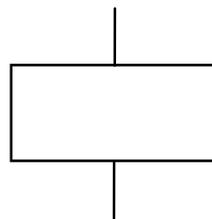
5. *Специальная схема:* отображает любую другую разрешенную комбинацию входных сигналов, для её изображения используется символ



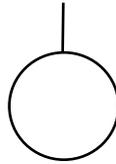
6. *Вход* или *выход* изображаются с помощью треугольников, что позволяет избежать повторения отдельных участков дерева. Прямая, входящая в вершину треугольника, означает переход внутрь соответствующей ветви, а прямая, берущая начало из середины боковой стороны треугольника, - переход к другой ветви.



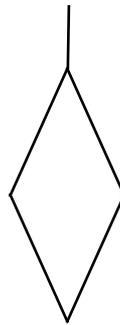
7. *Результирующее событие:* наступает в результате заранее определенной комбинации неисправностей на входе логической схемы. Для условного обозначения результирующего события применяется следующий символ:



8. *Первичный отказ (или неисправность элемента),* изображается в виде кружка



9. *Неполное событие*: - 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. Для условного изображения неполного события применяется следующий символ:



## 2.2. 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.

### **2.3. 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 2.1. Построить дерево отказов для простейшей системы освещения, электрическая схема которой показана на рис. 2.1. 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 от лампочки.

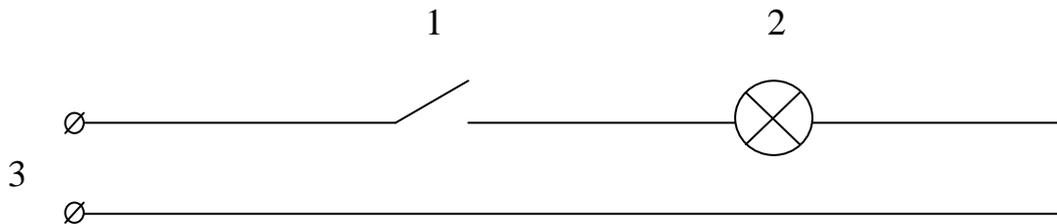


Рис. 2.1. Электрическая схема системы освещения.

Дерево отказов для той системы представлено на рис 2.2. Основными, или первичными, событиями дерева неисправностей являются (1) отказ источника питания  $E_1$ , (2) отказ выключателя  $E_2$  и (3) перегорание (отказ) лампочки  $E_3$ .

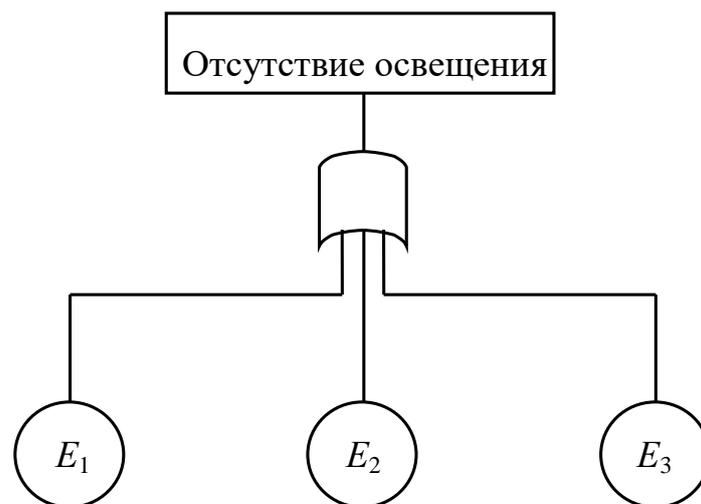


Рис. 2.2. Дерево отказов для случая первичных отказов.

Наибольший интерес представляет завершающее событие - «отсутствие освещения», и поэтому именно ему уделяется основное внимание при анализе. Дерево неисправностей, изображенное на рис. 7.2, 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 2.2. На рис. 2.3 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. 2.3, 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).

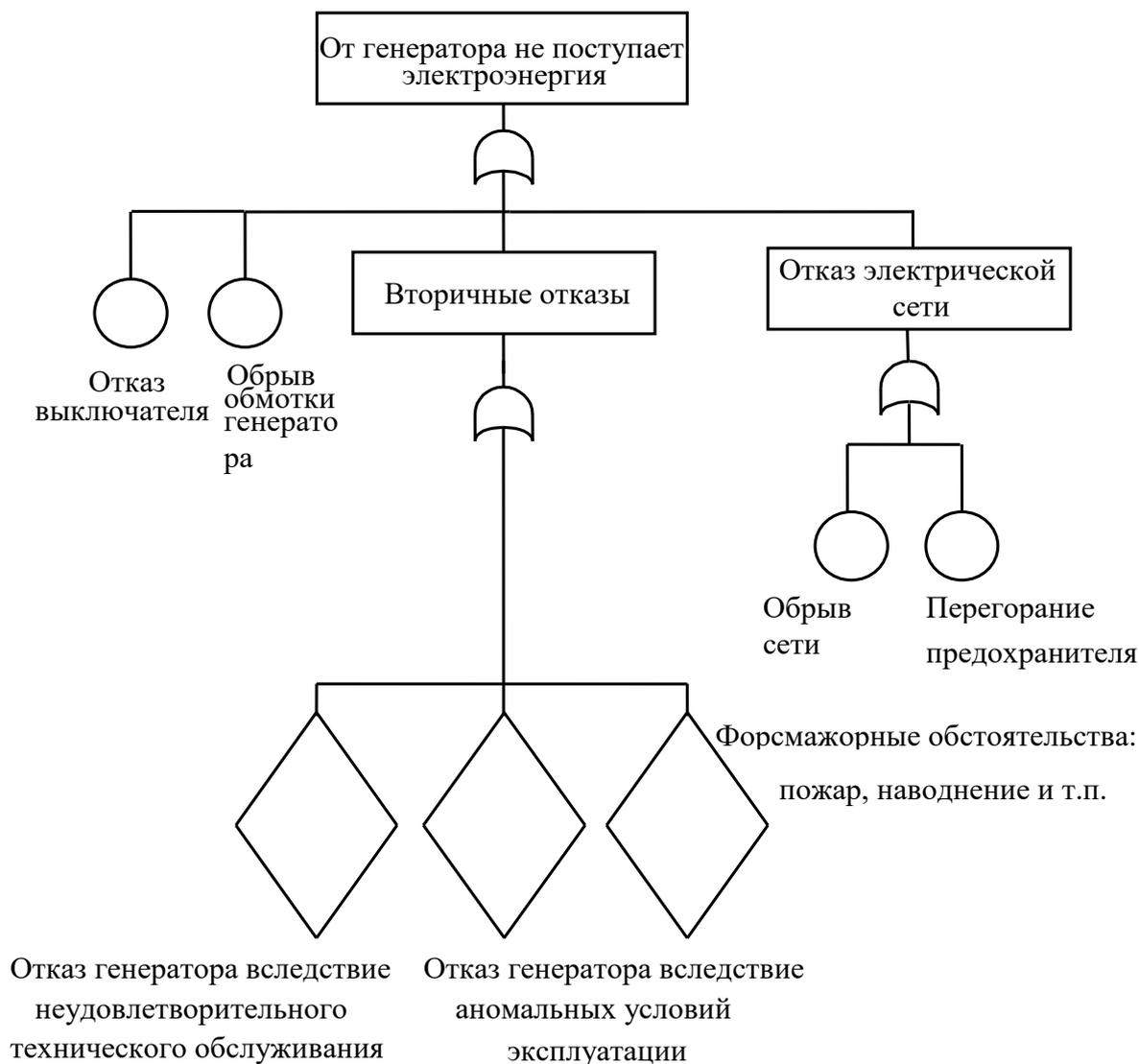


Рис. 2.3. Дерево неисправностей для случая вторичных отказов.

Пример 2.3. Типичным примером инициированного отказа является поступление ошибочного сигнала на какое-либо электротехническое устройство (например, двигатель или преобразователь). Взаимосвязь между основными и инициированными отказами показана на рис. 2.4.

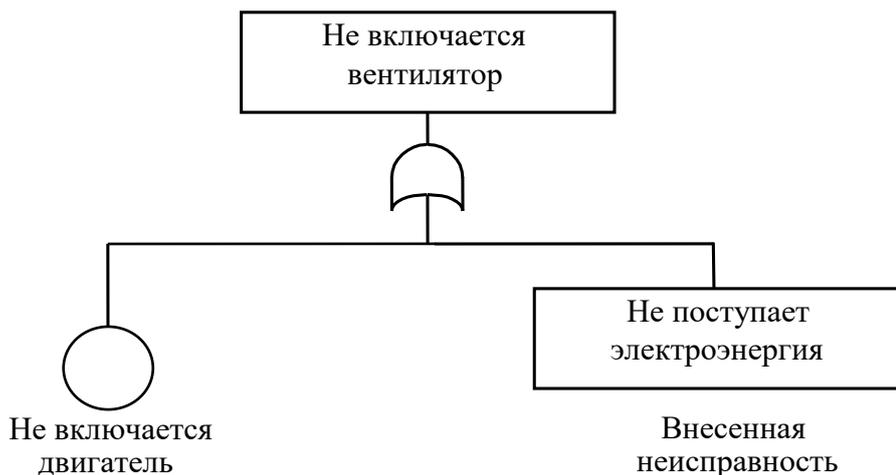


Рис. 2.4. Дерево неисправностей для случая основных и инициированных отказов.

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:

$$P(A) = P(B) \cdot P(V). \quad (2.1)$$

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:

$$P(\Gamma) = P(D) + P(E) - P(D) \cdot P(E). \quad (2.2)$$

Пример 2.4. 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.2.5).

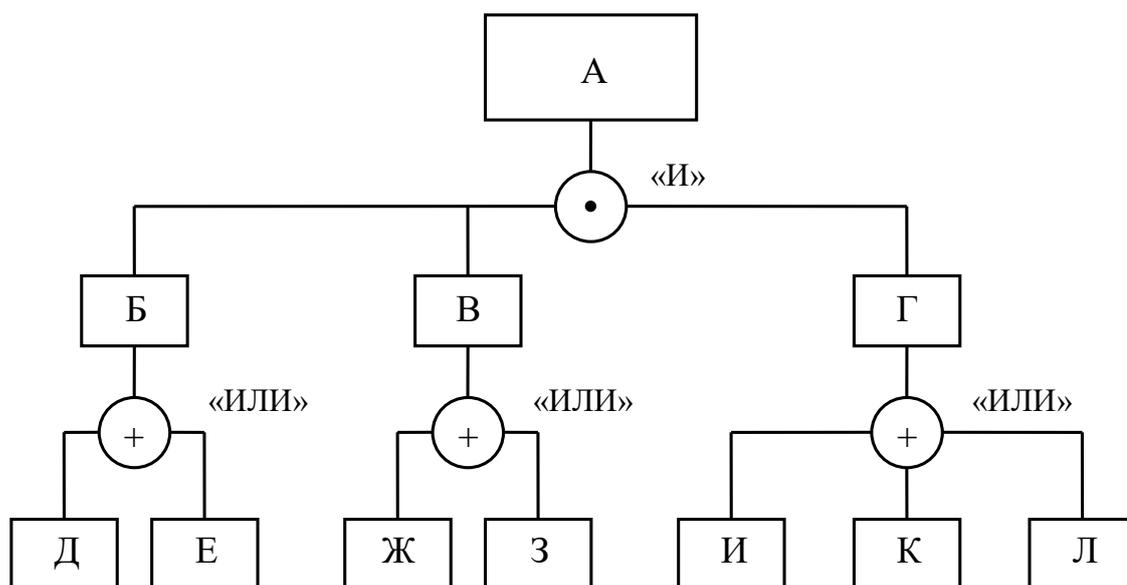


Рис.2.5. Дерево причин поражения человека электрическим током

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 не возникновения головного события «А». Аналитически выражение условия реализации данного несчастного случая имеет вид:

$$P(A) = P(B) \cdot P(B) \cdot P(\Gamma) = [P(D)+P(E)] \cdot [P(\text{Ж})+P(\text{З})] \cdot [P(\text{И})+P(\text{К})+P(\text{Л})]. \quad (2.3)$$

Пример 2.5. В автотранспортном предприятии автомобиль-тягач из-за технической неисправности был отправлен в ремонт, а на замену ему из резерва был взят другой тягач. Никто не обратил внимания на то, что резервный тягач оказался другой модели. Сцепное устройство резервного тягача было такой же конструкции, только расположено на другой высоте от земли.

Во дворе предприятия водитель тягача 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, покотился 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. 7.6.

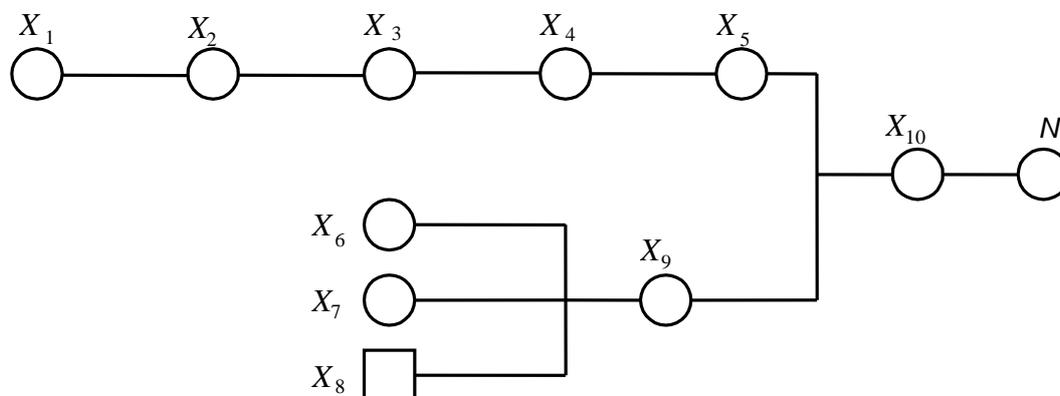


Рис. 2.6. Дерево причин аварии тягача.

- $X_1$  - обычно используемый тягач вышел из строя;
- $X_2$  - другой тягач использовался в работе;
- $X_3$  - различие в высоте прицепа и нового тягача;
- $X_4$  - осуществление сцепки невозможно;
- $X_5$  - водитель встает между тягачом и прицепом;
- $X_6$  - не включен ручной тормоз;
- $X_7$  - вибрации от работающего двигателя;
- $X_8$  - двор имеет уклон;
- $X_9$  - тягач движется к прицепу;
- $X_{10}$  - 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 таблице 2.1.

Таблица 2.1

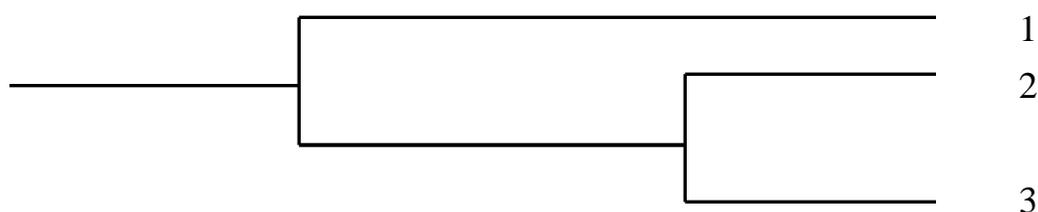
Результаты анализа происшествия

| 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 прицепе и тягача                     | Техническая несовместимость оборудования | Стандартизация соединения оборудования        |
| Не включен стояночный тормоз, работающий двигатель | Недостаточная подготовка персонала       | Инструктаж водителей                          |

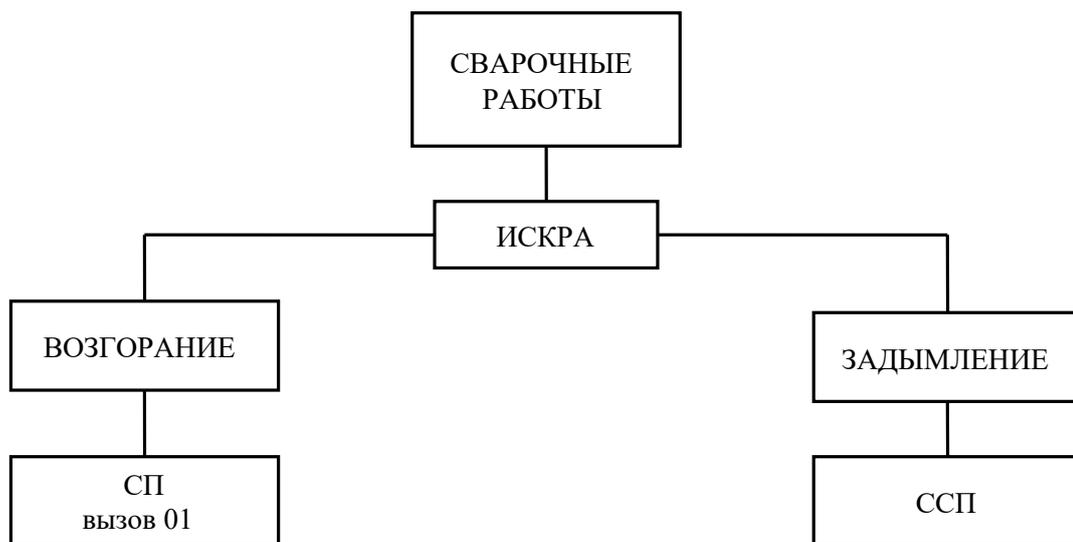
Пример 2.6. При построении «дерева событий» для определения безопасности выполнения сварочных работ исходное событие аварии

(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.2.7., где «ступенька» верх означает срабатывание соответствующей системы, а «ступенька» вниз – ее отказ.

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



а)



б)

Рис.7.7. Дерево событий при выполнении сварочных работ:

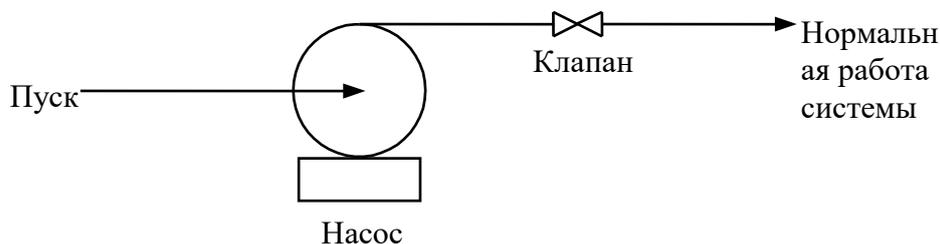
а) – принципиальная схема; б) – диаграмма событий

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

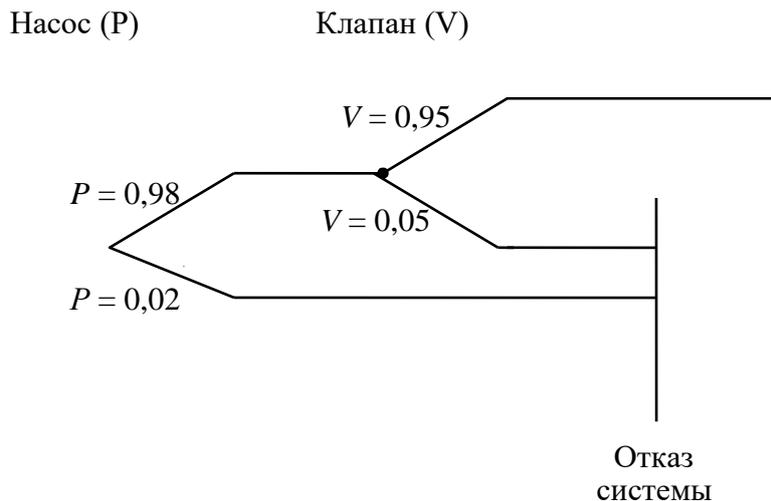
наступления ИСА и вероятность отказов ССП и СП, то с помощью методов теории вероятностей можно рассчитать риск пожара с тяжелыми последствиями.

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.

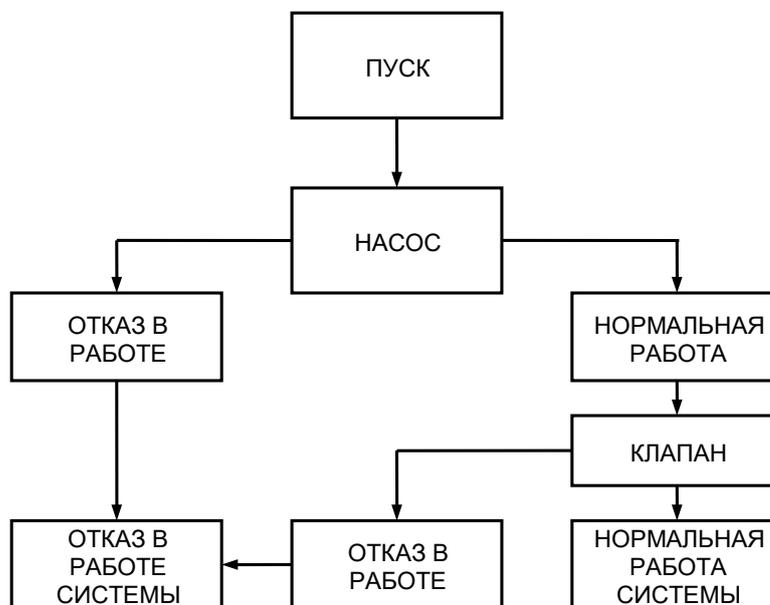
Пример 2.7. На рис.2.8. показана система последовательно соединенных элементов, которая включает насос и клапан, имеющие соответственно вероятности безотказной работы 0,98 и 0,95, а также приведено дерево решений для этой системы. Согласно принятому правилу верхняя ветвь соответствует желательному варианту 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.2.8. 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.2.2).

Таблица истинности

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

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

#### 2.4. 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. 2.9.

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.

Количественная оценка дерева осуществляется либо статического моделирования, либо аналитическим методом.

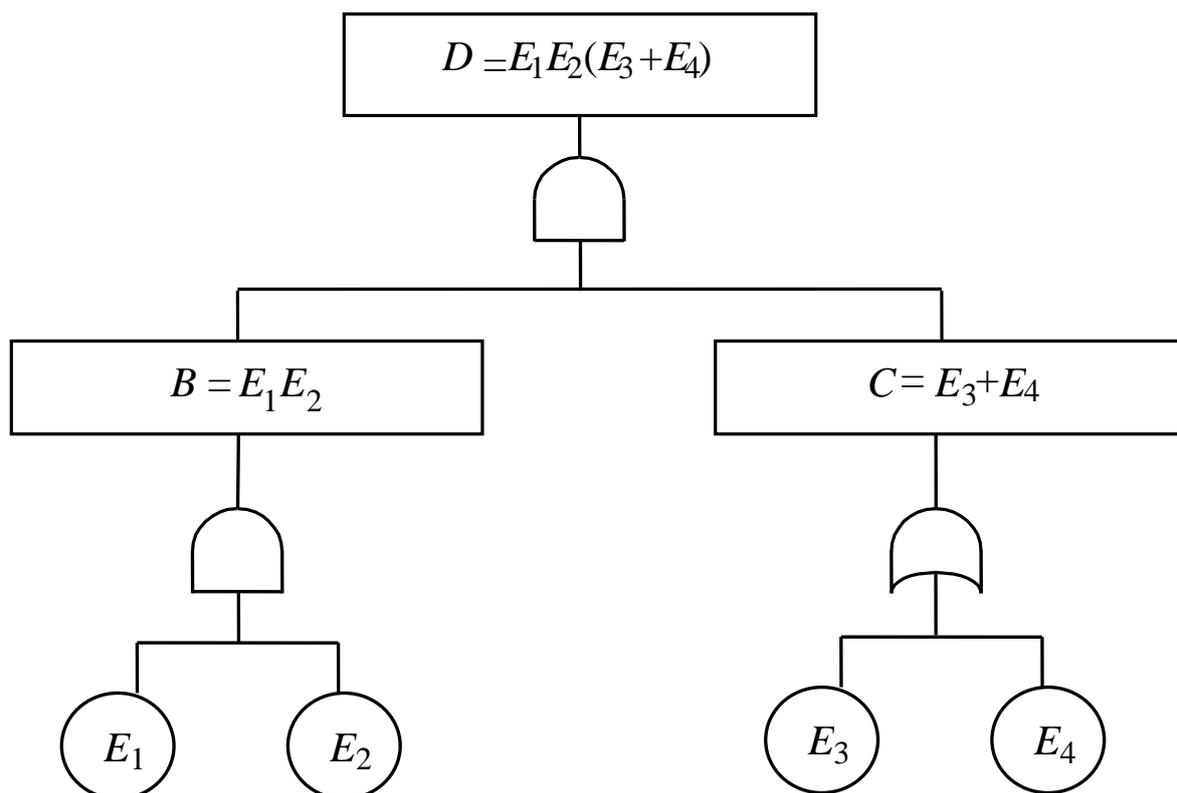


Рис. 2.9. Дерево неисправностей для гипотетического случая.

*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  $C$ .

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 сечении;
- вычисление требуемых конечных результатов.

Во втором случае используют существующие аналитические методы.

## 2.5. 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 схем *ИЛИ* с двумя событиями на входе дано на рис. 7.10.

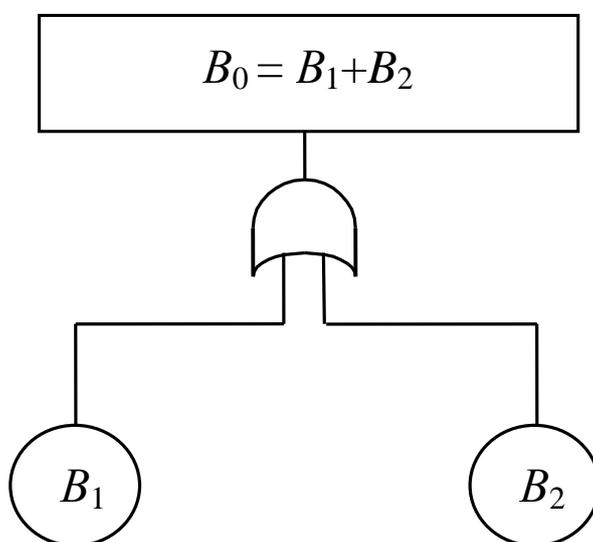


Рис.7.10. Схема *ИЛИ* с двумя входами.

Событие  $B_0$  на выходе схемы *ИЛИ* записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 + B_2, \quad (2.4)$$

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.2.11.

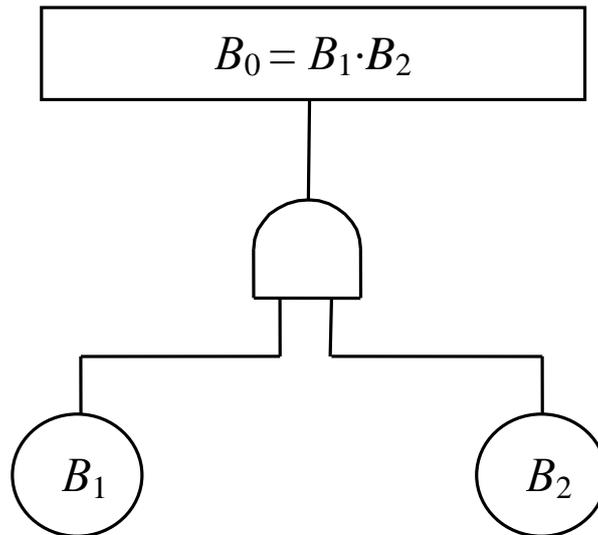


Рис.2.11. Схема И с двумя входами.

Событие  $B_0$  на выходе схемы И записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 \cdot B_2. \quad (2.5)$$

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. 2.12. В данном случае предполагается, что событие  $A_1$  должно наступить раньше события  $A_2$ .

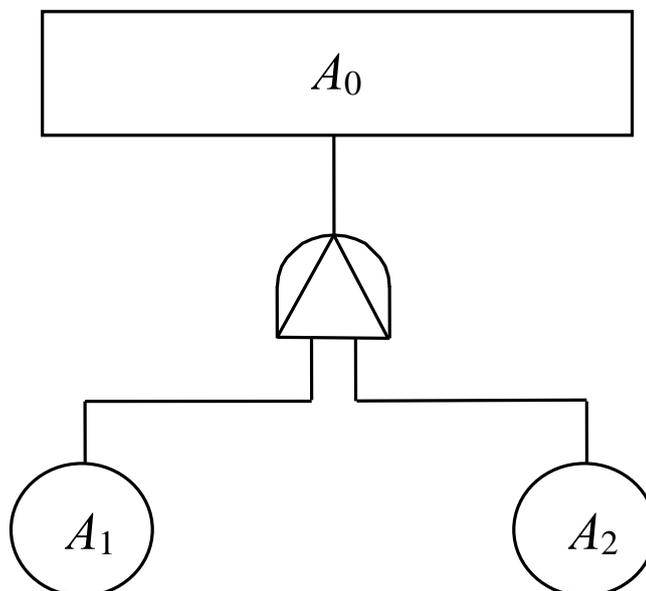


Рис. 2.12. Схема И с приоритетом с двумя входами.

## 2.6. Дерево с повторяющимися событиями

Характерная конфигурация такого дерева неисправностей показана на рис. 2.13.

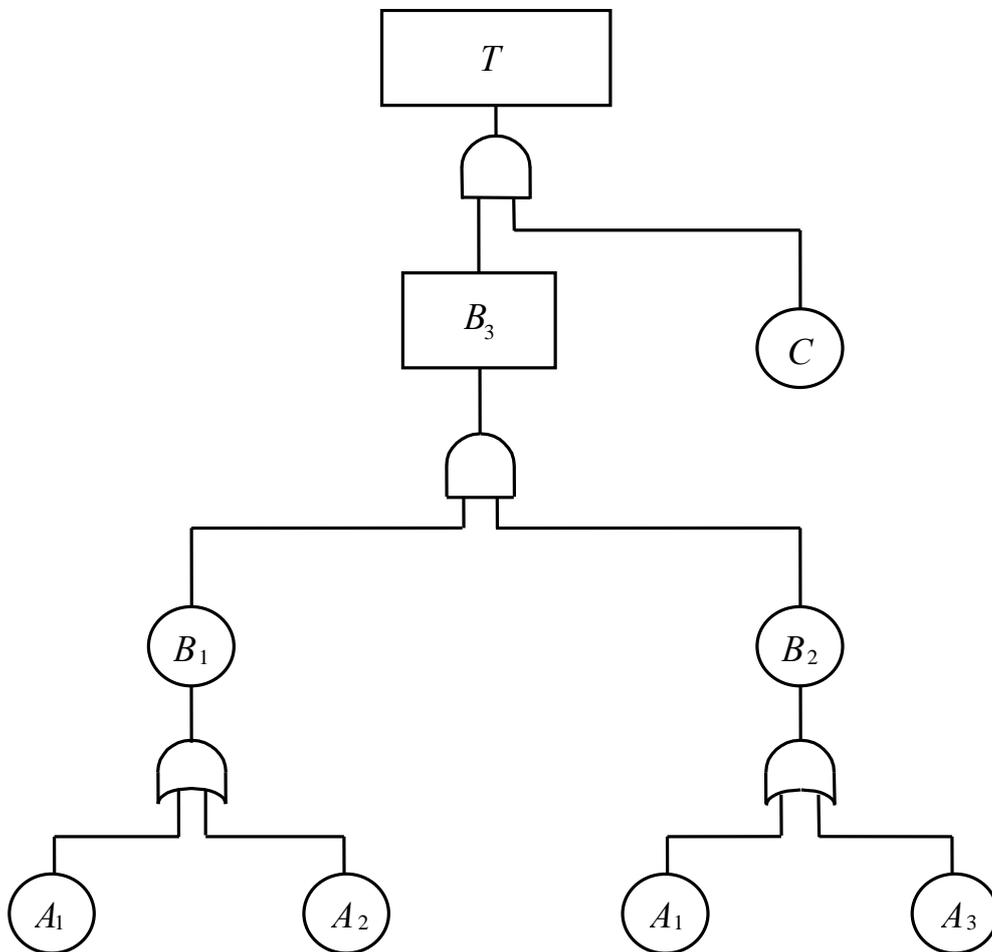


Рис. 2.13. Дерево отказов в случае повторяющихся событий:  
 $A_1, A_2, A_3$  и  $C$  - элементарные события;  $B_1, B_2, B_3$  - промежуточные события;  $T$  - завершающее событие.

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

$$\begin{aligned} T &= C \cdot B_3, & B_1 &= A_1 + A_2, \\ B_3 &= B_1 \cdot B_2, & B_2 &= A_1 + A_3. \end{aligned}$$

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

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

Согласно рис. 2.13, отказ  $A_1$  является повторяющимся элементарным событием, поэтому полученное выражение необходимо упростить, используя распределительный закон булевой алгебры.

В результате получаем  $T = C \cdot [A_1 + A_2 \cdot A_3],$

и первоначальное дерево неисправностей (рис.2.13) принимает вид, показанный на рис.2.14.

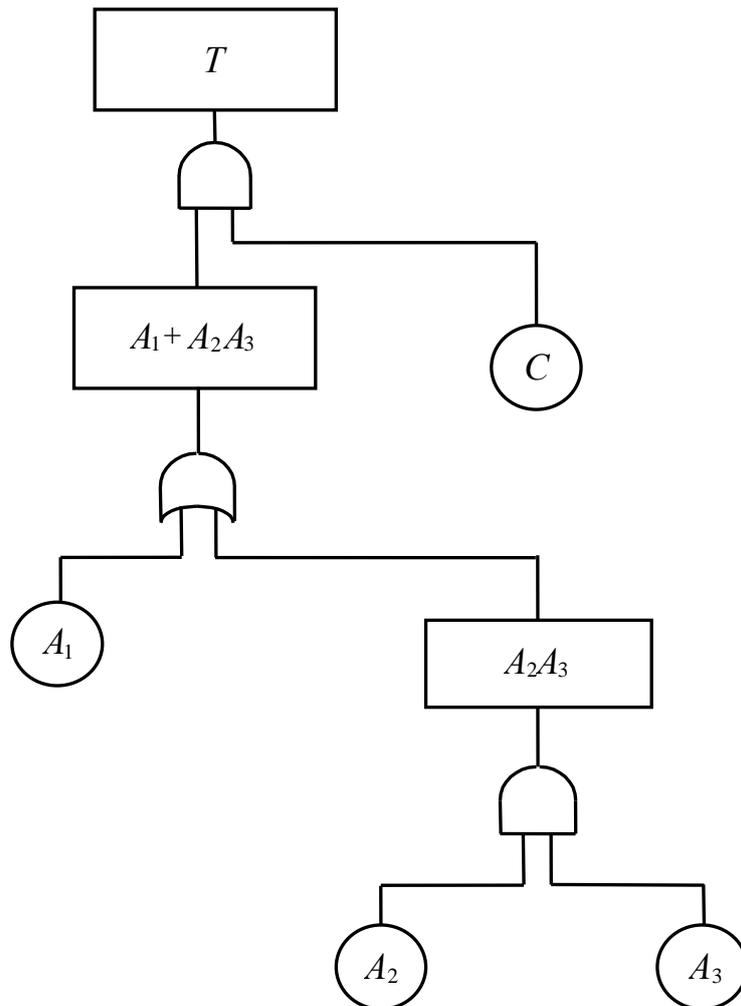


Рис. 2.14. Упрощенное дерево неисправностей.

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

## 2.7. Вероятностная оценка дерева отказов

**Схема ИЛИ.** Для пояснения вероятностного аспекта работы этой схемы проанализируем схему *ИЛИ* с двумя входами, изображенную на рис.2.15. Для этой схемы вероятность появления завершающего события имеет вид

$$P(T) = P(a) + P(b) - P(a \cdot b). \quad (2.6)$$

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

$$P(T) \approx P(a) + P(b). \quad (2.7)$$

В случае схемы *ИЛИ* с  $n$  входами имеем

$$P(a + b + c + \dots + n) \approx P(a) + P(b) + P(c) + \dots + P(n). \quad (2.8)$$

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.

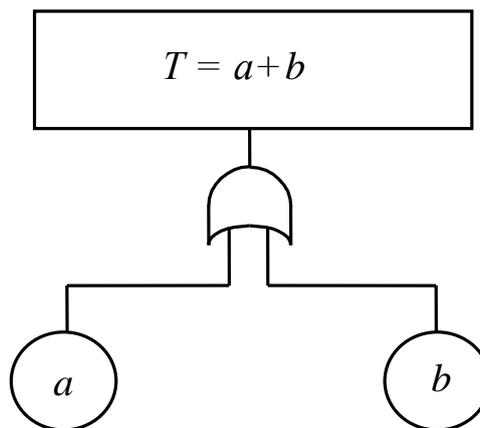


Рис. 2.15. Схема *ИЛИ* с двумя входами

**Схема И.** В случае схемы *И* с двумя входами (рис.2.16) события  $a$  и  $b$  статистически независимы и для получения вероятности появления завершающего события применяется правило умножения вероятностей:

$$P(ab) = P(a) \cdot P(b). \quad (2.9)$$

Для схемы *И* с  $n$  входами данное выражение можно записать в общем виде:

$$P(a \cdot b \cdot c \cdot \dots \cdot n) = P(a) \cdot P(b) \cdot P(c) \cdot \dots \cdot P(n). \quad (2.10)$$

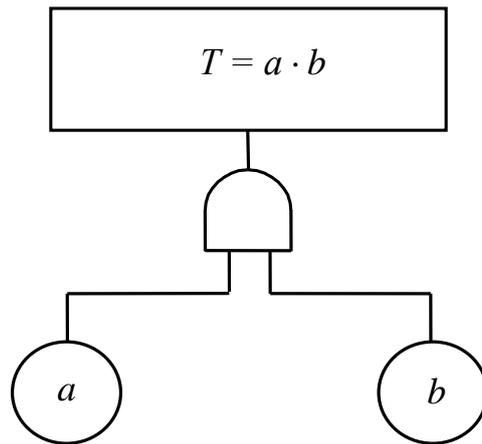


Рис. 2.16. Схема  $I$  с двумя входами.

Пример 2.8. Требуется вычислить вероятность появления завершающего события гипотетического дерева неисправностей, изображенного на рис. 2.17.

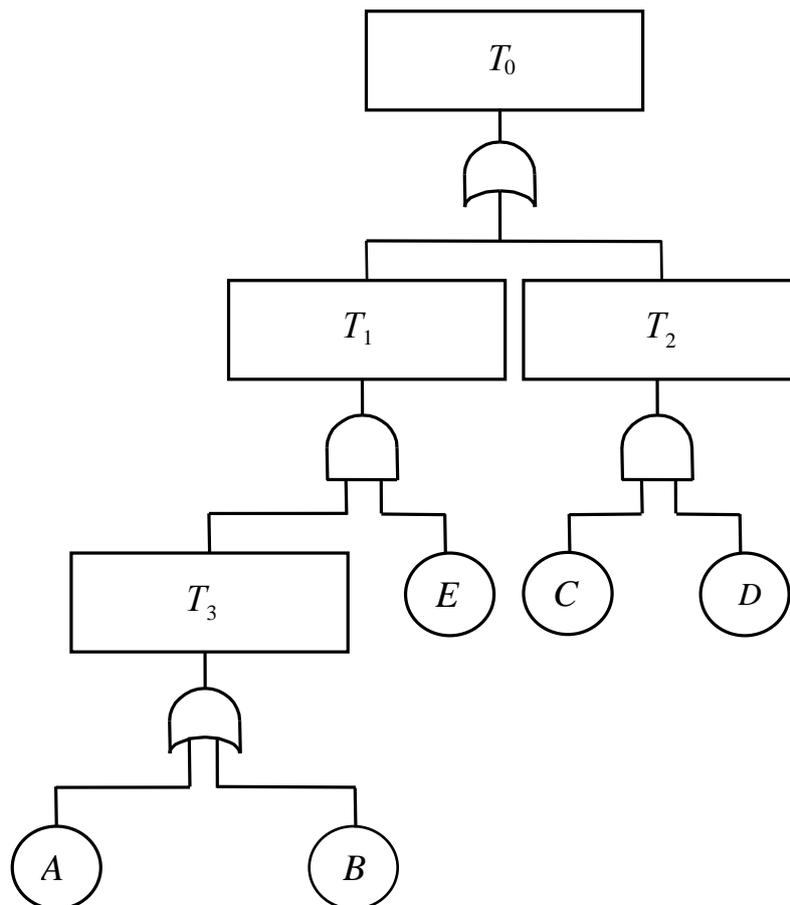


Рис. 2.17. Гипотетическое дерево событий.

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 событий (т.е. получить минимальные сечения).

Для данного дерева неисправностей решение может быть получено следующими двумя методами.

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

$$T_0 = T_1 + T_2.$$

Поскольку  $T_2 = C \cdot D$ ,  $T_1 = T_3 \cdot E$ ,  $T_3 = A + B$ , то  $T_0 = E \cdot (A + B) + C \cdot D$ , и, следовательно,

$$P(T_0) = P(E \cdot A + E \cdot B + C \cdot D).$$

Раскрывая полученное 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.** Этот 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:

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

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

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

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

Пример 2.9. Допустим, что в дереве неисправностей, изображенном на рис. 2.17, событие  $E$  заменяется событием  $D$  (рис. 2.18). 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

$$T_0 = (A + B) \cdot D + C \cdot D \quad \text{или} \quad T_0 = D \cdot A + B \cdot D + C \cdot D.$$

Вероятность появления завершающего события определяется по формуле

$$P(D \cdot A + B \cdot D + C \cdot D) = P(D \cdot A) + P(B \cdot D) + P(C \cdot D) - \\ - P(D \cdot A \cdot B \cdot D) - P(D \cdot A \cdot C \cdot D) - P(B \cdot D \cdot C \cdot D) + P(D \cdot A \cdot B \cdot D \cdot C \cdot D).$$

В случае неповторяющихся статистически независимых событий

$$P(D \cdot A + B \cdot D + C \cdot D) = P(A) \cdot P(D) + P(B) \cdot P(D) + P(C) \cdot P(D) - P(D) \cdot P(A) \cdot P(B) - \\ - P(A) \cdot P(C) \cdot P(D) - P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D).$$

Следовательно, вероятность появления завершающего события равна

$$P(D \cdot A + B \cdot D + C \cdot D) = 1/25 + 1/25 + 1/25 - 1/125 - 1/125 - 1/125 + 1/625 \\ = 61/625.$$

Однако если вначале исключаются повторяющиеся события, то дерево неисправностей, представленное на рис. 2.18, приводится к дереву, показанному на рис. 2.19. Выражение для завершающего события этого дерева неисправностей принимает вид

$$T_0 = D \cdot T_1,$$

где  $T_1 = A + B + C$ .

В случае статистически независимых событий вероятность появления завершающего события равна

$$P(D \cdot T_1) = P(D) \cdot P(T_1) = 1/5 \cdot 61/625 = 61/3125,$$

где  $P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A) \cdot P(B) - P(A) \cdot P(C) - \\ - P(B) \cdot P(C) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) = 61/625$ .

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.

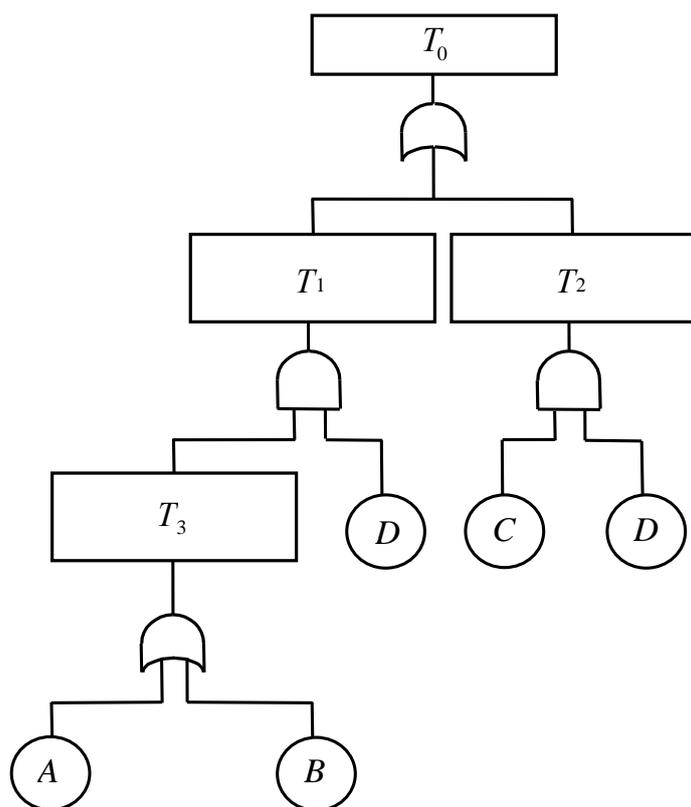


Рис. 2.18. Дерево неисправностей в случае повторяющегося события.

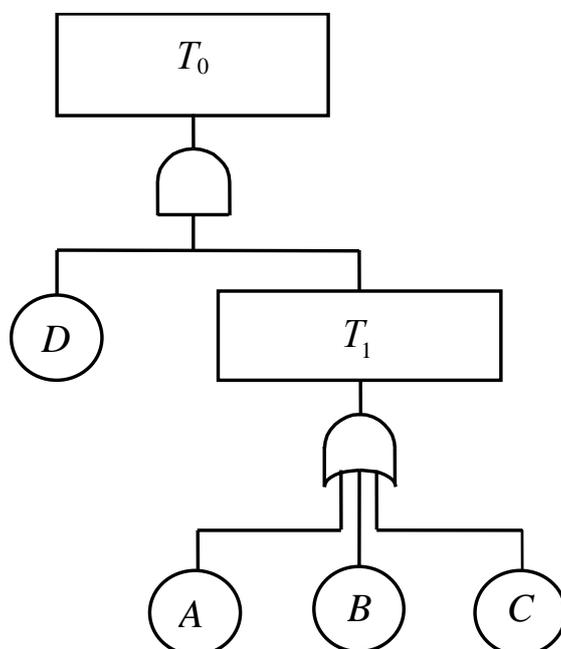


Рис. 2.19. Дерево неисправностей при отсутствии повторяющихся событий.

## **7.8. 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 анализ 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 сущность метода первичных отказов?
4. В чем сущность метода вторичных отказов?
5. В чем 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?

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ

#### 3.1. Критерии приемлемого риска

До недавнего времени нормативы безопасности во всем мире основывались на концепции абсолютной безопасности. Для предотвращения аварий внедрялись инженерные системы безопасности, принимались организационные меры, обеспечивающие высокий уровень дисциплины, строгий регламент работы. Считалось, что такой подход позволяет исключить любую опасность для населения и окружающей среды.

Однако сегодня из-за беспрецедентного усложнения производств и появления принципиально новых технологий, возросшей сети транспортных и энергетических коммуникаций, концепция абсолютной безопасности стала неадекватна внутренним законам техносферы и биосферы.

Ресурсы любого общества ограничены. А расходы на повышение безопасности растут экспоненциально, то есть каждый следующий шаг по направлению повышения безопасности обходится обществу всё дороже и дороже. Поэтому сообщество пришло к пониманию невозможности создания абсолютной безопасности (нулевого риска). Стремиться следует к достижению такого уровня риска от воздействия опасных факторов, который можно рассматривать как “приемлемый”. Его приемлемость должна быть обоснована исходя из экономических и социальных соображений. Необходимость формирования концепции приемлемого (допустимого) риска обусловлена невозможностью создания абсолютно безопасной деятельности (технологического процесса).

*Приемлемый риск* – риск гибели человека, который общество на данном этапе развития готово принять.

Во всех развитых в промышленном отношении странах существует устойчивая тенденция применения концепции приемлемого риска.

Среди подходов, предложенных для обоснования критериальных значений риска следует отметить метод экономического анализа безопасности, основанный на учете затрат на обеспечение безопасности и потерь от возможных аварий. Концепция нормирования безопасности предлагает задание риска следующим образом:

– абсолютная безопасность не может быть обеспечена, объект может быть только относительно безопасен;

- требования к уровню безопасности формируются на основе «приемлемого риска», связаны с социально-экономическим состоянием общества и являются производными этого состояния;

- определение риска осуществляется путем выявления различных факторов, влияющих на безопасность, и их количественной оценки.

Существуют и другие аспекты нормирования безопасности:

- риск не должен превышать уровня, достигнутого для сложных технических объектов с учетом природных воздействий;

- риск должен быть снижен настолько, насколько это практически достижимо в рамках соответствующих ограничений;

- не должно быть составляющих риска, резко превышающих другие (аналог принципа равнонадежности, применяемого при обеспечении надежности изделий).

Поэтому при оценке приемлемости различных уровней риска можно ограничиться рассмотрением риска лишь тех вредных последствий, которые, в конечном счете, приводят к смертельным исходам, поскольку для этого показателя существуют достаточно надежные статистические данные. Тогда, например, понятие “экологический риск” может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба, выраженного в количестве смертельных исходов от воздействия вредного экологического фактора за определенный интервал времени к нормированной величине интенсивности этого фактора.

Таким образом, главное внимание при определении технического, экологического и социального риска должно быть направлено на анализ соотношения возможного экономического ущерба, вредных социальных и экологических последствий, заканчивающихся смертельными исходами.

Общественная приемлемость риска связана с различными видами деятельности и определяется экономическими, социальными и психологическими факторами.

В общем случае под приемлемым риском понимается риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из экономических и социальных соображений.

Пример определения приемлемого риска представлен на рис. 3.1.

При увеличении затрат на совершенствование оборудования технический риск снижается, но растет социальный. Суммарный риск имеет минимум при определенном соотношении между инвестициями в техническую и социальную сферу. Это обстоятельство надо учитывать при выборе приемлемого риска. При определении социально приемлемого риска обычно используют данные о естественной смертности людей.

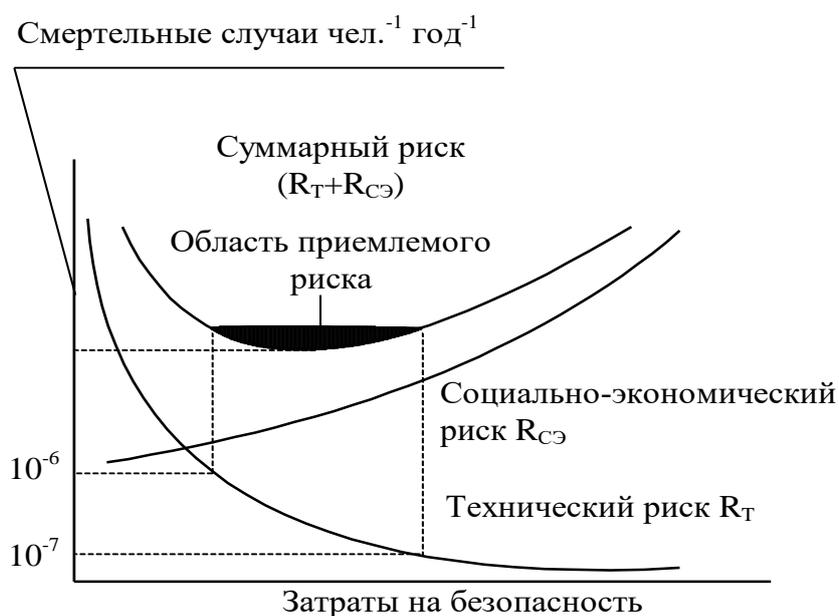


Рис. 3.1. Определение приемлемого риска

В качестве реперного значения *абсолютного риска* принимают величину летальных исходов (ЛИ):

$$R_A = 10^{-4} \text{ ЛИ/}(\text{чел}\cdot\text{год}).$$

В качестве реперного значения допустимого (приемлемого) риска при наличии отдельно взятого источника опасности принимают:

$$R_d = 10^{-5} \text{ ЛИ/}(\text{чел}\cdot\text{год});$$

$$R_d = 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ НС/}(\text{чел}\cdot\text{год}),$$

где НС – случаи нетрудоспособности.

Для населения величина дополнительного риска, вызванного техногенными причинами, не должна превышать реперное значение абсолютного риска:

$$R \leq R_A.$$

Для отдельно взятого источника опасности, учитывая, что индивидуальный риск зависит от расстояния  $R = R(r)$ , условие безопасности можно записать в виде:

$$R(r) \leq R_D.$$

В настоящее время по международной договоренности принято считать, что действие техногенных опасностей (технический риск) должно находиться в пределах от  $10^{-7}$  –  $10^{-6}$  (смертельных случаев чел<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>), а величина  $10^{-6}$  является максимально приемлемым уровнем индивидуального риска. В национальных правилах эта величина используется для оценки пожарной безопасности и радиационной безопасности.

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т.е. можно говорить о снижении индивидуального, технического или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

В связи со сложностью расчетов показателей риска, недостатком исходных данных (особенно по надежности оборудования, человеческим ошибкам) на практике часто используются методы анализа и критерии приемлемого риска, основанные на результатах экспертных оценок специалистов. В этом случае рассматриваемый объект обычно ранжируется по степени риска на четыре (или больше) группы с высоким, промежуточным, низким или незначительным уровнем риска. При таком подходе высокий уровень риска считается, как правило, неприемлемым, промежуточный требует выполнения программы работ по уменьшению уровня риска, низкий считается приемлемым, а незначительный вообще не рассматривается, как не заслуживающий внимания.

Таким образом, основными требованиями к выбору критерия приемлемого риска при проведении анализа риска являются обоснованность и определенность.

### 3.2. Управление риском

В соответствии с концепцией безопасности населения и окружающей среды практическая деятельность в области управления риском должна быть построена так, чтобы общество в целом получало наибольшую доступную сумму благ.

Управление риском – это анализ рискованной ситуации, разработка и обоснование управленческого решения, нередко в форме правового акта, направленного на минимизацию риска.

В принципах управления риском заложены стратегические и тактические цели. В стратегических целях выражено стремление к достижению максимально возможного уровня благосостояния общества в целом, а в тактических – стремление к увеличению безопасности населения и продолжительности жизни. В них оговариваются как интересы групп населения, так и каждого человека при защите от чрезмерного риска.

Важнейшим принципом является положение о том, что в управление риском должен быть включен весь спектр существующих в обществе опасностей, и общий риск от них для любого человека и для общества в целом не может превышать “приемлемый” уровень.

Схема процесса управления риском представлена на рис. 3.2.

Для проведения анализа риска, установления его допустимых пределов в связи с требованиями безопасности и принятия управляющих решений необходимы:

- наличие информационной системы, позволяющей оперативно контролировать существующие источники опасности и состояние объектов возможного поражения;
- сведения о предполагаемых направлениях хозяйственной деятельности, проектах и технических решениях, которые могут влиять на уровень техногенной и экологической безопасности, а также программы для вероятностной оценки связанного с ними риска;
- экспертиза безопасности и сопоставление альтернативных проектов и технологий, являющихся источниками риска;

- разработка технико-экономической стратегии увеличения безопасности и определение оптимальной структуры затрат для управления величиной риска и ее снижения до приемлемого уровня с экономической и экологической точек зрения;
- формирование организационных структур, экспертных систем и нормативных документов, предназначенных для выполнения указанных функций и процедуры принятия решений;
- воздействие на общественное мнение и пропаганда научных данных об уровнях техногенного и экологического рисков с целью ориентации на объективные оценки риска.

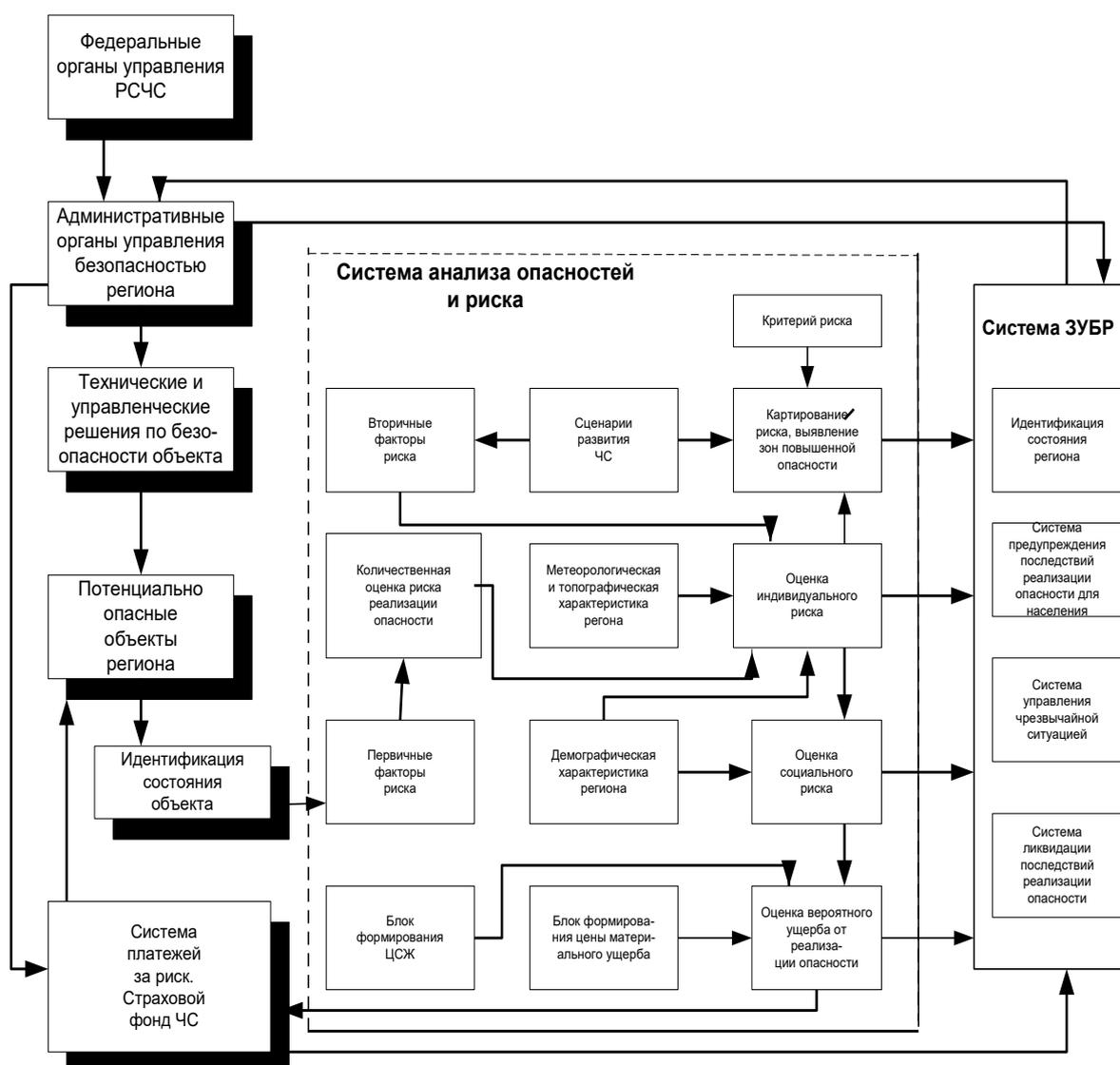


Рис. 3.2. Схема управления риском

Модель управления риском состоит из четырех частей и этапов.

Первый этап связан с характеристикой риска. На начальном этапе проводится сравнительная характеристика рисков с целью установления приоритетов. На завершающей фазе оценки риска устанавливается степень опасности (вредности).

Второй этап – определение приемлемости риска. Риск сопоставляется с рядом социально-экономических факторов:

- выгоды от того или иного вида хозяйственной деятельности;
- потери, обусловленные данным вида деятельности;
- наличие и возможности регулирующих мер с целью уменьшения негативного влияния на среду и здоровье человека.

Процесс сравнения опирается на метод “затраты – выгоды”.

В сопоставлении “нерисковых” факторов с “рисковыми” проявляется суть процесса управления риском.

Возможны три варианта принимаемых решений:

- риск приемлем полностью;
- риск приемлем частично;
- риск неприемлем полностью.

В настоящее время уровень пренебрежимого предела риска обычно устанавливают как 1% от максимально допустимого.

В двух последних случаях необходимо установить пропорции контроля, что входит в задачу третьего этапа процедуры управления риском.

*Третий этап* заключается в выборе одной из “типовых” мер, способствующей уменьшению (в первом и во втором случае) или устранению (в третьем случае) риска.

*Четвертый этап* – принятие регулирующего решения – определение нормативных актов (законов, постановлений, инструкций) и их положений, соответствующих реализации той “типовой” меры, которая была установлена на предшествующей стадии. Данный элемент, завершая процесс управления риском, одновременно увязывает все его стадии, а также стадии оценки риска в единый процесс принятия решений, в единую концепцию риска.

### **3.3. Применение теории риска в технических системах**

Проектирование сложных технических систем и конструкций выполняется на основе численных методов с использованием компьютеров. Однако вычисленные на основе таких расчетов параметры и характеристики следует рассматривать как приближенные, которые отличаются от действительных. Отклонения расчетных параметров от действительных представляют собой случайные величины, которые зависят от условий задачи.

Путем применения теории риска можно оценить неточности, возникающие при расчете и проектировании конструкций. Вероятностный метод вычисления риска позволяет получить новую информацию о том, какое влияние на величину риска оказывают разные источники неопределенности в процессе расчета и проектирования конструкции и как это отражается на окончательном проекте.

Однако при использовании численных методов возникают неточности расчета, оценка которых приобретает особое значение при определении вероятного риска.

В инженерных задачах исходные данные часто бывают далеко не полными. Так, например, величина внешних сил изменяется во времени; свойства материала, из которого сделана конструкция, также определяются как средние и имеют разброс. Возникают термины “допустимый предел”, “инженерное решение”, которые подтверждают отсутствие достаточной точности в исходных данных. В результате для описания вероятности разрушения конструкции возникает понятие “риск”, которым характеризуют полученное решение.

В состав крупных сооружений входят объекты, имеющие различную степень ответственности в обеспечении безопасности, например в гидротехническом узле наиболее ответственным объектом является плотина, менее ответственными – здания, трубопроводы и т.д. Однако желательно принимать для всех объектов одинаковую меру риска. Принцип сбалансированного риска требует, чтобы все объекты, входящие в состав сооружения, проектировались на обеспечение одинаковой степени риска.

При решении многих инженерных задач приходится определять риск, который возникает как результат снижения затрат при производстве и эксплуатации технической системы. Риск определяется на основе

обработки статистическими методами большого числа наблюдений. Величина риска зависит от ожидаемой выгоды. Как правило, повышение величины риска приводит к снижению расходов на создание технической системы и увеличению ожидаемой выгоды. Но вместе с тем это повышение может повлечь за собой разрушение технической системы в более короткий срок или с большей долей вероятности. Поэтому определение принимаемой величины риска является весьма ответственной задачей, которая может быть правильно решена только путем проведения глубокого статистического анализа.

Функциональная зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой выражается нелинейным законом, как это показано на рис. 3.3.

Построенная на этом рисунке кривая делит координатную плоскость на две части. Справа от кривой расположены значения, которые могут быть при известных условиях приняты (эта область заштрихована). Точки, расположенные слева от кривой, относятся к неприемлемым значениям.

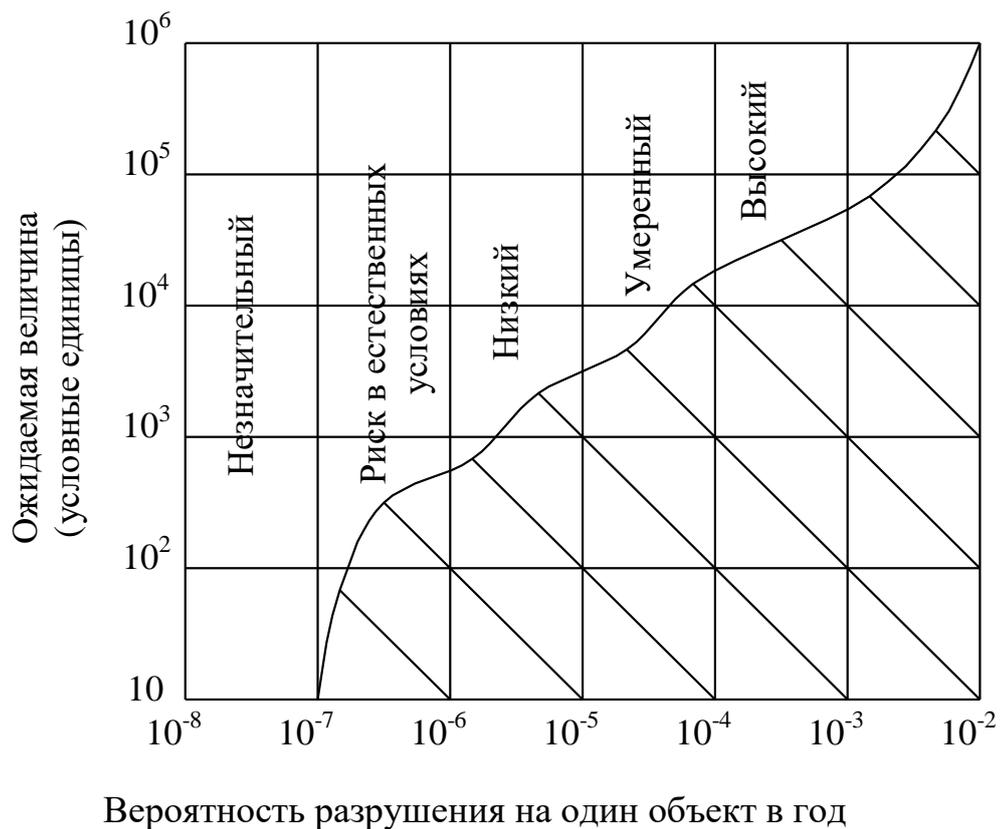


Рис. 3.3. Зависимость величины риска от затрат

Рассмотрим подробнее физический смысл числового выражения риска. Наиболее полные статистические данные имеются для риска, которым характеризуются несчастные случаи в разных областях производства. Так, например, риск, характеризуемый числом  $10^{-3}$  случаев на одного человека в год, является совершенно неприемлемым. Уровень риска  $10^{-4}$  требует принятия мер и может быть принят только в том случае, если другого выхода нет. Так, риск в автомобильных авариях в Российской Федерации достигает уровня  $2 \cdot 10^{-4}$ . Уровень риска  $10^{-5}$  соответствует естественным случайным событиям, например, несчастным случаям при купании в море, для которых риск исчисляется  $3,7 \cdot 10^{-5}$ . Несчастные случаи, обусловленные риском  $10^{-6}$ , относятся к такому уровню, на который имеется более спокойная реакция, так как считается, что избежать этого риска может каждый, соблюдая элементарные правила предосторожности.

Аналогичным образом величина риска может быть установлена и для каждой технической системы с учетом срока службы, ее значения для общей прочности всего сооружения, а также стоимости, срока восстановления и т.д.

Очень часто для оценки риска принимается частота возникновения аварийных ситуаций, например, число случаев разрушения плотин в год и их негативные последствия - число несчастных случаев, которые вызваны этой аварией.

При проектировании принимаются решения, которые могут увеличить или уменьшить величину риска в процессе эксплуатации конструкции. Для того чтобы оценить влияние неточностей, допущенных при проектировании, следует для данной конструкции оценить вероятные пути, в результате которых может произойти разрушение. Для простейшей конструкции очень часто можно предвидеть единственный путь вероятного разрушения и тогда задача упрощается. Однако для сложных конструкций и сооружений разрушение может развиваться разными путями, имеющими различную вероятность.

Коэффициент надежности вычисляется для каждой намеченной схемы разрушения по формуле 3.1

$$F_{rf} = \prod_{i=1}^n (R_i) , \quad (3.1)$$

где  $R_i$  – множитель, характеризующий коэффициент надежности для каждой схемы.

Зависимость между вероятностью  $P$  разрушения, выраженной в процентах, и коэффициентом надежности  $F$  получается в виде:  $P = 10\% - F = 3,5$ ;  $P = 1\% - F = 10$ ;  $P = 0,1\% - F = 20$ .

Вероятность того, что разрушение произойдет по выбранной последовательности событий  $D$ , вычисляется по формуле 3.2

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)^{m_j}, \quad (3.2)$$

где  $m_j$  – число участков для выбранной схемы разрушения.

Решая технические задачи, необходимо учитывать риск, возникающий в результате неопределенностей при выборе исходных данных для расчетов. При определении допускаемого риска необходимо учитывать вероятность благоприятного и неблагоприятного результата при эксплуатации проектируемой технической системы. Величина риска определяется на основе общих математических методов: теории вероятностей, математической статистики и теории игр. Для измерения величины риска, соответствующего данному варианту решения, проектировщик должен исследовать влияние всех влияющих факторов. Определение риска особое значение приобретает при проектировании новых сооружений и сложных технических систем. Правильное использование теории риска очень часто приводит к тому, что проектируемая техническая система может обойтись дешевле.

Очень часто понятие риска связывают с оценкой возможного ущерба. Для правильного понимания существа вопроса целесообразно определять риск как возможность отклонения принятого решения от той величины, которая соответствует оптимальным условиям эксплуатации объекта.

Затраты на производство технических систем связаны с принятой при проектировании величиной риска. При большом риске снижается стоимость первоначальных затрат, однако в дальнейшем при неблагоприятном стечении обстоятельств в технической системе могут возникнуть повреждения, ликвидация которых связана с дополнительными расходами. Малая величина риска, принятая при проектировании, потребует увеличения прочности и надежности элементов технической системы, а это повышает стоимость ее производства. Если в процессе дальнейшей эксплуатации не произойдет неблагоприятного стечения обстоятельств, то первоначальное удорожание производства технической

системы для увеличения прочности и надежности ее элементов оказывается не нужным. Таким образом, увеличение риска приводит к удешевлению производства, а снижение риска вызывает удорожание производства.

### **3.4. Оценка риска аварий**

Порядок разработки декларации безопасности опасных производственных объектов учитывает анализ условий возникновения и развития аварий, который включает:

- выявление возможных причин возникновения и развития аварийных ситуаций с учетом отказов и неполадок оборудования, возможных ошибочных действий персонала, внешних воздействий природного и технического характера;
- определение сценариев возможных аварий;
- оценку количества опасных веществ, способных участвовать в аварии;
- обоснование применяемых для оценки опасностей моделей и методов расчета.

Приведенные данные причин пожаров (табл. 3.1) способствуют проведению идентификации опасных и вредных факторов на объектах хранения нефтепродуктов. Можно выделить следующие опасности: взрыв (В), пожар (П), отравление (О) персонала токсическими веществами, загрязнение (З) окружающей природной среды (ОПС). Все эти нежелательные события могут наступать в случае нарушения технологического регламента работ на объектах или отступления от инструкций. Можно обоснованно полагать, что в значительной мере указанные опасности будут проявляться совместно, т.е. взрыв будет сопровождаться пожаром, отравлением персонала и загрязнением ОПС.

В свою очередь, пожар может привести к взрыву и последующему воздействию на персонал и ОПС. Загрязнение среды светлыми нефтепродуктами (СНП) - бензином и керосином - в ряде случаев может сопровождаться взрывом и пожаром. В табл. 3.2 приведены эти опасности в зависимости от стадии технологического процесса и оборудования.

При анализе риска опасных промышленных объектов допускаются самые разнообразные методы, в том числе и экспертные процедуры. В основе последних лежат субъективные оценки, опирающиеся на известную эксперту информацию. Работа с априорной информацией представляет

особую разновидность вероятностных процедур, включая субъективные (персональные) вероятности.

Таблица 3.1

Причины пожаров на объектах хранения нефтепродуктов

| Причины пожара                      | Количество пожаров | Процент от общего количества пожаров | Число погибших людей | Процент от общего числа погибших |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Установленные поджоги               | 7                  | 3,10                                 | 0                    | 0                                |
| Неисправность оборудования          | 58                 | 25,66                                | 6                    | 31,58                            |
| НПУЭ:                               |                    |                                      |                      |                                  |
| - электрооборудования               | 17                 | 7,52                                 | 3                    | 15,78                            |
| - печей                             | 1                  | 0,44                                 | 0                    | 0                                |
| - теплогенерирующих установок       | 0                  | 0                                    | 0                    | 0                                |
| - бытовых газовых устройств         | 0                  | 0                                    | 0                    | 0                                |
| НППБ электрогазовых работ           | 25                 | 11,06                                | 0                    | 0                                |
| Взрывы                              | 1                  | 0,44                                 | 0                    | 0                                |
| Самовозгорание веществ и материалов | 6                  | 2,65                                 | 0                    | 0                                |
| Неосторожное обращение с огнем      | 86                 | 38,05                                | 9                    | 47,37                            |
| Грозовые разряды                    | 1                  | 0,44                                 | 9                    | 0                                |
| Неустановленные                     | 6                  | 2,65                                 | 1                    | 5,26                             |
| Прочие                              | 18                 | 7,96                                 | 0                    | 0                                |

Примечание: НПУЭ - нарушение правил устройства и эксплуатации; НППБ - нарушение правил пожарной безопасности.

Таблица 3.2

## Опасности технологического процесса и оборудования

| Технологическая операция                         | Функциональный блок (сооружение, оборудование, помещение) |         |         |         |       |         |
|--|---|---------|---------|---------|-------|---------|
|  | СНЭ   | ПНС     | ТТ      | РП      | Л     | ПХ      |
| Слив, зачистка, налив (железнодорожные цистерны) | В,П,О,З   |         |         |         |       |         |
| Перекачка СНП                                    |   | В,П,О,З | В,П,О,З |         |       |         |
| Хранение СНП                                     |   |         |         | В,П,О,З |       |         |
| Ремонт резервуаров                               |   |         |         | В,О     |       |         |
| Отбор проб, проведение замеров уровня СНП        | В,П,О   |         |         | В,П,О   | В,П,О | В,П,О,З |

Примечание. СНЭ – сливно-наливная эстакада; ПНС – продуктово-насосная станция; ТТ – технологический трубопровод (для перекачки СНП); РП – резервуарный парк; Л – лаборатория; ПХ – помещения для хранения СНП, отобранных для анализа.

Для определения вероятности наступления неблагоприятного события, например взрыва  $Q_6$ , надо знать вероятности исходных событий – образования парогазовой смеси  $Q_{2.1}$  и появления источника воспламенения  $Q_{2.2}$ . Для определения вероятности первого исходного события  $Q_{2.1}$  можно использовать данные для показателей, формирующих коэффициент  $K_1$  (частные факторы взрывоопасности), приведенные в табл. 3.3.

Анализ специфических свойств керосина разных марок и бензинов показал отсутствие у них принципиальных различий. Оба они являются легковоспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ), но упругость паров бензина значительно (в среднем на 1 - 2 порядка) выше упругости паров керосина. Поэтому в условиях производства при нормальной температуре в закрытых объемах бензин может образовывать паровоздушные смеси, способные к взрыву от внешних источников, в то время как керосин практически их не образует.

Таблица 3.3

## Взрывопожароопасные свойства бензина и керосина

| Показатели, формирующие коэффициент $K_1$              | Бензин БР-1 | Керосин |
|--|-------------|---------|
| Диапазон концентрационных пределов воспламенения       | 0,02        | 0,02    |
| Нижний концентрационный предел воспламенения           | 0,13        | 0,13    |
| Минимальная энергия зажигания                          | 0,09        | 0,09    |
| Температура среды                                      | 0,01        | 0,01    |
| Давление среды (избыточное)                            | 0           | 0       |
| Плотность газа (пара) по отношению к плотности воздуха | 0,10        | 0,10    |
| Объемное электрическое сопротивление                   | 0,06        | 0,06    |
| Особо опасные характеристики                           | 0           | 0       |

Коэффициент  $K_1$ , имеющий достаточно высокое значение (0,41), можно связать с вероятностной составляющей, принимая субъективную вероятность образования паровоздушной смеси бензина близкой к 0,4. Что касается керосина, то эта величина в значительной мере зависит от его состава. Для авиационных топлив она приближается к 0,4, а для осветительного керосина может быть принята на порядок ниже, т.е. 0,04.

Статистика пожаров и взрывов свидетельствует о том, что источники воспламенения проявляются достаточно часто. Поэтому на этапе оценки опасности можно принять субъективную вероятность появления источника зажигания (воспламенения)  $Q_{2,2}$  равной 0,4 (такой же, как  $Q_{3,13} = 0,40$ ). В этом случае для модели оценки вероятности взрыва бензина он составит  $0,4 \cdot 0,4 = 0,16$ . Иначе говоря, один случай из шести может закончиться взрывом. Для осветительного керосина эта величина на порядок меньше (0,016), т.е. только 1 случай из 60 будет сопровождаться взрывом.

Наиболее значимым является анализ источников воспламенения. Свой вклад вносят аппаратура с огневым обогревом, искрение и перегрев токоведущих систем, удар и трение. Анализ реальных случаев позволил

оценить вклад источников воспламенения равный 0,14. Из этой величины 0,12 приходится на искрение и перегрев токоведущих частей. Вероятности проявления других источников воспламенения следующие: атмосферное электричество (молния, гроззовые разряды),  $Q_{3.10} = 0,05$ ; разряд статистического электричества,  $Q_{3.11} = 0,09$ ; тлеющее пламя (транспорт),  $Q_{3.12} = 0,02$ ; открытое пламя (неосторожное обращение с огнем),  $Q_{3.13} = 0,40$ ; другие источники,  $Q_{3.14} = 0,10$ . Составляющие вероятности более низкого уровня на данном этапе не анализируются.

Для анализа риска применительно к опасным факторам «Взрыв» и «Пожар» использовали данные о 226 пожарах на складах ЛВЖ и ГЖ, имевших в качестве источника загорания ЛВЖ. Эти пожары сопровождалась гибелью 19 человек. Отсюда можно в первом приближении определить, что один погибший приходится на 12 пожаров. Считая, что вероятность взрывов и пожаров с участием бензина равно 0,16, получаем вероятность смертельного травмирования, равную 0,013.

Проведенный анализ показал, что потенциальная вероятность аварии на объектах по хранению нефти и нефтепродуктов достаточно высокая. Существенный вклад в эту составляющую вносят ошибки персонала.

Причинами ошибок персонала могут быть рассеянность, привычные ассоциации, низкая бдительность, ошибки альтернативного выбора, неадекватный учет побочных эффектов и неявных условий, малая точность, слабая топографическая, пространственная ориентировка. Важным средством предотвращения аварий в данном случае является четкое соблюдение отраслевых правил, норм и инструкций.

## **Контрольные вопросы**

1. Каким образом определяются критерии приемлемого риска?
2. В чем заключается процесс управления риском?
3. Какая существует зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой?
4. Какова взаимосвязь между затратами на производство технических систем с принятой при проектировании величиной риска?
5. В чем состоит анализ условий возникновения и развития аварий?
6. Какими могут быть причины ошибок персонала?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Содержание учебного пособия соответствует образовательному стандарту по дисциплине «Управление рисками» для направления «Техносферная безопасность». С целью ограничения объема пособия материалы ряда глав даны в сокращенном виде. Автор рекомендует более пристальное внимание уделить вопросам, связанным с управлением рисками: цели и основные этапы анализа риска и методы анализа риска, особенно анализ деревьев событий и неисправностей, как наиболее информативные и трудоемкие.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветошкин, А. Г. Надежность и безопасность технических систем: учеб. пособие / А. Г. Ветошкин, В. И. Марунин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – 129 с. -
2. Животкевич, И. Н. Надежность технических изделий / И. Н. Животкевич, А. П. Смирнов. – М. : Ин-т испытаний и сертификации вооружений и военной техники, 2004. – 472 с. – ISBN 5-98040-003-6.
3. Корчагин, А. Б. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 : Основы теории / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 228 с. – ISBN 978-5-8149-1066-0. – ISBN 978-5-8149-1067-7 (ч. 1).
4. Штриплинг, Л. О. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / Л. О. Штриплинг. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – 108 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 4  |
| 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РИСКА.....  | 5  |
| 1.1. Понятие риска.....  | 5  |
| 1.2. Классификация видов риска.....                                      | 9  |
| 1.3. Методология анализа и оценки риска.....                             | 12 |
| 1.4. Качественные методы анализа риска.....                              | 17 |
| 1.5. Количественная оценка риска.....                                    | 21 |
| 2. ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА.....                          | 27 |
| 2.1. Определения и символы, используемые при<br>построении деревьев..... | 27 |
| 2.2. Анализ деревьев отказов.....  | 30 |
| 2.3. Построение дерева отказов.....                                      | 31 |
| 2.4. Качественная и количественная оценка дерева отказов.....            | 42 |
| 2.5. Аналитический вывод простых схем дерева отказов.....                | 44 |
| 2.6. Дерево с повторяющимися событиями.....                              | 46 |
| 2.7. Вероятностная оценка дерева отказов.....                            | 48 |
| 2.8. Преимущества и недостатки метода дерева отказов.....                | 53 |
| 3. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ<br>БЕЗОПАСНОСТИ.....        | 55 |
| 3.1. Критерии приемлемого риска.....                                     | 55 |
| 3.2. Управление риском.....  | 59 |
| 3.3. Применение теории риска в технических системах.....                 | 62 |
| 3.4. Оценка риска аварий.....  | 66 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....  | 72 |
| Список использованной литературы.....                                    | 73 |