

## Оглавление

<b>Предисловие .....</b>	<b>8</b>
<b>Перечень условных сокращений .....</b>	<b>10</b>
<b>Введение .....</b>	<b>12</b>
<b>Раздел 1. Теория факторного параметрического моделирования безопасности (опасности) систем вида «защита — объект — среда» (ЗОС)....</b>	<b>27</b>
<b>1.1. Теоретико-лингвистическая формулировка проблемы .....</b>	<b>27</b>
1.1.1. Разработка понятийного аппарата для моделирования безопасности и риска системы.....	27
1.1.2. Принципы системного анализа предпосылок и функций опасности .....	30
<b>1.2. Построение факторного параметрического базиса системы .....</b>	<b>35</b>
1.2.1. Обоснование эквивалентности ситуационного и множественно-параметрического описания опасности в системе .....	35
1.2.2. Выбор и описание опорных множеств опасных и вредных факторов.....	37
1.2.3. Описание факторного параметрического базиса системы ....	38
<b>1.3. Построение комплекса критериев для выявления булевых и параметрических предпосылок опасности ....</b>	<b>40</b>
1.3.1. Постановка задачи.....	40
1.3.2. Формальное построение критериев выявления предпосылок опасности.....	40
1.3.3. Построение критериев выявления логических предпосылок .....	42
<b>1.4. Классификация свойства безопасности СТС на основе применения комплекса критериев .....</b>	<b>44</b>
1.4.1. Построение критериев классификации в терминах опорных подмножеств .....	44
1.4.2. Оценка эффективности полученного комплекса критериев .....	46

1.4.3. Результаты множественной параметрической классификации безопасности сложной системы .....	47
<b>1.5. Формулировка проблемы в множественно-предикативной форме .....</b>	<b>47</b>
<b>1.6. Выводы по разделу 1 .....</b>	<b>48</b>
<b>Раздел 2. Исследование логических функций опасности в упорядоченной системе .....</b>	<b>50</b>
<b>2.1. Анализ состояния вопроса и формулировка цели .....</b>	<b>50</b>
<b>2.2. Описание безопасности системы в виде булевого базиса системы .....</b>	<b>51</b>
2.2.1. Введение булевого базиса системы .....	51
2.2.2. Выбор изоморфных представителей в базисах ББС и ФПБ .....	53
<b>2.3. Формулировка дифференциальных критериев выявления логических предпосылок опасности .....</b>	<b>54</b>
<b>2.4. Вывод булевой формы функции связности системы .....</b>	<b>55</b>
<b>2.5. Характеристики и теоремы безопасности с учетом связности предпосылок опасности .....</b>	<b>58</b>
2.5.1. Введение и определение характеристик безопасности .....	58
2.5.2. Доказательство булевых теорем о безопасности системы .....	60
<b>3.6. Формулировка проблемы на основе булевого базиса и множества функций опасности .....</b>	<b>61</b>
<b>2.7. Выводы по разделу 2 .....</b>	<b>61</b>
<b>Раздел 3. Определение возможностной (нечеткой) меры реализации происшествий в системе .....</b>	<b>63</b>
<b>3.1. Формулировка целей раздела .....</b>	<b>63</b>
<b>3.2. Соотношение мер определенности возникновения происшествия в системе .....</b>	<b>64</b>
<b>3.3. Построение нечеткого множественно-параметрического базиса системы .....</b>	<b>66</b>
3.3.1. Элементы и операции базиса .....	66
3.3.2. Возможностная мера отказа. Формальный аспект .....	67
3.3.3. Физический аспект возможностной меры отказа .....	69
3.3.4. Описание расширенной алгебры нечетких множеств .....	69
<b>3.4. Доказательства теорем о соответствии базисов <math>A_M, A_P, A_3</math> .....</b>	<b>70</b>

<b>3.5. Аналитический метод определения возможностной меры реализации предпосылок опасности .....</b>	<b>72</b>
3.5.1. Постановка и общий алгоритм решения задачи .....	72
3.5.2. Формальное определение возможностной меры реализации опасности .....	74
3.5.3. Возможностная мера реализации однопараметрической предпосылки .....	76
<b>3.6. Метод установления возможностной меры реализации предпосылок опасности по нечеткой информации о системе .....</b>	<b>77</b>
3.6.1. Формулировка задачи .....	77
3.6.2. Выбор и описание краевых условий .....	78
3.6.3. Детальное описание нечеткой модели системы .....	83
3.6.4. Вывод зависимости возможностной меры отказа в однопараметрической системе .....	85
3.6.4.1. <i>Общее решение</i> .....	85
3.6.4.2. <i>Определение возможностной меры по интегральной аддитивной погрешности параметров R и S.</i> .....	87
3.6.4.3. <i>Установление аналитического выражения возможностной меры реализации критической функции опасности</i> .....	90
<b>3.7. Определение возможностной меры реализации параметрической предпосылки по границам размытости и уровням различимости .....</b>	<b>92</b>
3.7.1. Постановка задачи .....	93
3.7.2. Решение задачи для трех вариантов граничных условий .....	94
3.7.3. Возможностная мера при гауссовой аппроксимации ФП параметров .....	96
3.7.4. Установление потенциальной погрешности определения ВМ .....	98
3.7.5. Примеры нахождения ВМ и достижимого уровня её различимости .....	99
<b>3.8. Вывод зависимости интегрального риска в рамках нечеткого множественно-параметрического базиса .....</b>	<b>101</b>
<b>3.9. Формулировка проблемы в рамках нечеткого факторного параметрического базиса системы .....</b>	<b>102</b>
<b>3.10. Выводы по разделу 3 .....</b>	<b>102</b>
<b>Раздел 4. Аналитико-алгоритмические методы и информационно-расчетные средства</b>	

<b>для возможностной оценки риска сложных систем .....</b>	<b>103</b>
4.1. Основные этапы решения проблемы оценки риска в условиях нечеткой информации о системе .....	103
4.2. Общий алгоритм установления показателей риска .....	104
4.3. Программа «Возмер» для расчёта возможностной меры риска сложных систем .....	106
4.4. Диалоговая обучающая подсистема ввода исходных данных и расчета дифференциальных и интегральных возможностных мер .....	108
4.5. Требования к формализации, подготовке и сбору исходных данных о конкретной системе .....	109
4.6. Алгоритм и программа визуализации моделирования объектов и их связей .....	111
<b>Раздел 5. Примеры апробации методологии мониторинга и возможностной оценки показателей сложных систем .....</b>	<b>113</b>
5.1. Факторный параметрический анализ и оценка риска системы «предприятие с аварийными химически опасными веществами — нерегламентированные факторы — средства и мероприятия защиты» .....	114
5.1.1. Этап инженерной экспертизы безопасности системы и подготовка исходных данных .....	114
5.1.2. Установление факторных параметрических критериев происшествия в системе .....	118
5.1.3. Преобразование параметрических критериев в булеву форму .....	120
5.1.4. Аналитическое выражение возможностных мер происшествий в системе .....	121
5.1.5. Расчет ВМ в однопараметрической модели предпосылок происшествий .....	121
5.1.6. Анализ полученных результатов оценки собственной безопасности и риска предприятия с АХОВ .....	125
5.1.7. Выводы .....	127
5.2. Факторное параметрическое моделирование и обоснование системы «имитационно-тренажерный комплекс — оператор повышенного риска» .....	128
5.2.1. Построение факторного параметрического базиса системы «технический объект — рабочая среда — оператор» .....	129

---

5.2.2. Обоснование применения и оценка эффективности обучения операторов в системе «имитационно-тренажерный комплекс — оператор повышенного риска».....	132
5.2.3. Заключение .....	135
<b>5.3. Инженерная методика определения функций преобразования теплового воздействия в конструкции объекта .....</b>	<b>136</b>
5.3.1. Постановка задачи.....	136
5.3.2. Общий алгоритм решения задачи и его апробация .....	137
<b>5.4. Расчет показателей риска системы «человек — жилой блок — опасные и вредные факторы — средства защиты» .....</b>	<b>141</b>
<b>5.5. Факторная параметрическая модель и методика возможностной оценки качества услуг населения Ростовской области .....</b>	<b>145</b>
5.5.1. Описание исследуемой системы .....	145
5.5.3. Параметрическая модель оценки качества отдельной услуги и возможностная мера удовлетворения потребителя.....	148
<b>Заключение .....</b>	<b>150</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>152</b>

## Предисловие

В работе основное внимание уделено теоретическому обоснованию концепции приемлемого риска на основе разработки новой методологии факторного параметрического моделирования и возможностной (нечеткой) оценки безопасности и риска, рассматриваемой как синтез детерминированной и вероятностной методологий. Приводятся основные результаты исследований, полученных в рамках гранта РФФИ 03-07-90084, а также в диссертации руководителя. Рассмотрены вопросы обоснования и построения универсального базиса факторных параметрических моделей комплексного свойства «опасность — безопасность» сложных систем. Разработан и описан метод возможностной оценки риска системы вида «факторы среды — способы и средства защиты — потенциально опасные объекты», представленный на сайте РАС ЮРГУЭС, раздел «Наука», <http://www.rostincerv.ru/наука>.

Приведены результаты разработки и апробации информационной технологии мониторинга и расчета возможностной меры риска и показателей системы сервиса, основанной на программе «Возмер» (программа для ЭВМ № 2006613133). Представленные результаты могут служить основой для обоснования и проведения мониторинга сложных систем и конструкций, грант РФФИ 06-08-01259.

Несмотря на кажущуюся сложность работы, её результаты, особенно приложения, могут найти широкое применение в различных областях знаний, а также в технике и экономике. В частности:

- 1) при уточнении паспортов безопасности и показателей риска объектов ГО ЧС;
- 2) при обосновании страховой деятельности и техногенного и экологического аудита;
- 3) при оценке и обосновании способов и средств защиты потенциально опасных объектов и систем;
- 4) при подготовке специалистов в области риск-менеджмента.

По мнению авторов, книга может быть полезна как студентам и аспирантам, так и преподавателям и научным работникам, занимающимся обоснованием показателей качества, эффективности, безопасности и риска сложных организационных, технических и экологических систем с позиций выбранного комплексного показателя и (или) цели. Кроме того, предложенная методология и информационная технология факторного пара-

---

метрического моделирования может быть использована при разработке и создании новых экспертных систем.

## Перечень условных сокращений

АВПКО	— Анализ Видов, Последствий и Критичности Отказов <sup>i</sup>
АО	— активный отказ; АС <sup>ii</sup> — аварийная ситуация;
АЭС	— атомная электростанция;
ББС	— <sup>iii</sup> булевый базис системы;
БП	— булева переменная; БФ — булева функция;
ВМ	— возможностная мера; ВО — возможностная оценка;
ДО	— дерево отказов;
ЛМ	— логическая модель; ЛСО — логическая схема опасности;
ЗОС	— защита — объект — среда;
НФ	— нерегламентированные факторы;
НМ	— нечеткое множество;
ОВФ	— опасные и вредные факторы;
ОС	— окружающая среда (обстановка ситуации);
ПН	— показатель надежности;
ПОО (Э)	— потенциально опасный объект (элемент);
САМБО	— Система Автоматизированного Моделирования БезОпасности;
СЛСО	— структурно логическая схема опасности;
СМЗ	— средства и мероприятия защиты;
СТС	— сложная техническая система;
ТО	— технический объект;
Ч	— человек;
ФПБ	— факторный параметрический базис;
ФО	— факторы обстановки, причем рассматриваются и нумеруются следующие материальные факторы:
1	— механический (гравитационный) фактор (МФ);
2	— тепловой (термодинамические, термический) фактор (ТФ);
3	— электрический (электромагнитный) фактор (ЭФ);
4	— химический фактор (ХФ);
5	— радиоактивный фактор (РФ);
6	— фооновый фактор (излучение с энергией 1 КэВ и более) (ФНФ);
7	— оптический фактор (излучение) (ОФ);
8	— биологический фактор (БФ);
АХОВ	— аварийные химически опасные вещества;





ФП	— функция принадлежности;
ФС	— функция связности (связанности);
ЧС	— чрезвычайная ситуация;
PSA	— технология <sup>iv</sup> : Probabilistic Safety Assessment Technology — вероятностная технология оценки безопасности;
$A_M$	— алгебра множеств; $A_P$ — алгебра решеток;
$A_3$	— алгебра Заде; $A_{3H}$ (ЗД) — алгебра Заде с непрерывными (дискретными) величинами.
$R$	— множество параметров восприимчивости ;
$V^i$	— множество параметров вторичных воздействий (факторов);
$V^e$	— множество параметров внешних воздействий (факторов);
$F$	— множество операторов преобразования $V \rightarrow S$ ;
$S$	— множество параметров факторов, действующих непосредственно на входы (конструкцию) ПОЭ объекта;
$E$	— бинарное множество (решетка) видовой восприимчивости ПОО;
$X$	— бинарное множество (решетка) индикаторов превышения элементов множества $S$ над элементами множества $R$ ;
$Y$	— бинарное множество (решетка) индикаторов образования множества $V^i$ в ПОО (его потенциально опасными элементами);
$M_S = (\mu_s(\lambda_s))$	— множество функций принадлежности нечетких величин, заданных множеством — носителем $S$ ;
$\pi$	— обозначение возможностной (нечеткой) меры;
Pos (...)	— оператор возможностной меры;
$p$	— обозначение вероятностной меры;
Pro (...)	— оператор вероятностной меры;
$\Pi = (\pi_{m \ i \ l \ k})$	— множество возможных мер;
$P = (p_{m \ i \ l \ k})$	— множество вероятностных мер;
$N = (n_{m \ i \ l \ k})$	— множество мер необходимости.

## Введение

В результате накопления опыта разработки, производства, эксплуатации и утилизации потенциально опасных объектов (ПОО) выросло понимание неизбежности принятия *стратегии «приемлемого риска»* на основе баланса показателей «эффективность — безопасность — стоимость» [1–3, 15–18, 31]. Из горьких уроков аварий и чрезвычайных происшествий одним из выводов является признание необходимости установления гарантированных мер «предоплаты» за возможность: 1) оценить и избежать потенциального ущерба, или хотя бы 2) оценить и ослабить, или 3) ранжировать и учесть его при разработке и эксплуатации ПОО.

Как отражение взглядов «абсолютной безопасности» и неучета системного характера безопасности и риска ряд ученых трактуют безопасность технических объектов «как состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства» [1], механически перенося это определение из Закона РФ «О безопасности» 1992 г.

Не прибавляет в понимании соотношений категорий «безопасность» и «риск» определение, сделанное коллегией Госстандарта РФ о том, что «безопасность — отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения ущерба» [44].

Приходится констатировать, что в России значительная часть объектов и конструкций гражданского и промышленного назначения физически устарели и (или) находятся на пределе нормативных сроков эксплуатации. Кроме того, существуют реальные угрозы действия как террористических и экстремистских сил, так и действия нерегламентированных факторов при аварийных и (или) чрезвычайных ситуациях. В связи с этим в последнее время в стране принят ряд законов и законодательных актов, направленных как на декларацию опасных объектов, процессов и услуг, направленных как<sup>vi</sup> на обеспечение их безопасности путем сертификации, а также принятия дополнительных мер [1–4, 9].

Вследствие ограниченности финансовых и материальных ресурсов весьма актуальным является вопрос о приоритете в обеспечении средств и методов защиты потенциально опасных объектов по степени и уровню их опасности и риска. Это настоятельно требует скорейшей разработки методов количественного анализа и оценки свойства «безопасность — опасность» и риска применительно к системам «человек — машина — среда».

Одним из наиболее важных направлений в обеспечении безопасности техногенных систем является разработка единой методики и на ее основе

информационной технологии оценки безопасности (риска) систем повышенной опасности и принятие комплекса стандартных показателей безопасности (риска) для всех видов воздействующих факторов применительно к физически разнородным объектам. При этом исследование безопасности любой системы достижимо только путем изучения ее опасности в полном объеме и во всей глубине, с выявлением полного набора возможно опасных источников, связей, причин и следствий.

В государственном масштабе важнейшей научной задачей Федеральной целевой научно-технической программы (ФЦНТП) «Безопасность» (руководители: академик РАН К. В. Фролов и член-корреспондент РАН Н. А. Махутов), заданной объединенным решением Российской академии наук, Министерства обороны, Министерства образования и науки и Министерства по чрезвычайным ситуациям на период с 1997 по 2015 гг. [1–3, 17, 52], является обоснование теории, критериев и уровней риска с учетом потенциальных и реализуемых опасностей и ущербов в природно-техногенной сфере и вероятностей возникновения аварий и катастроф. При решении такой задачи предусматривается, что невозможно получить полную и достоверную исходную информацию, особенно для тяжелых аварийных и катастрофических ситуаций, необходимо принимать решения в условиях неполной и (или) нечеткой информации, активно используя при этом методы анализа некорректных обратных задач. В настоящее время в технологию проектирования сложных технических систем (СТС) введены элементы технологии вероятностной оценки безопасности и риска. Процедура их выполнения приближается к стандартной, но эффект от их применения не однозначен. Разница в расчетных и реальных величинах вероятностей крупных аварий достигает от 2 до 3 порядков [1, 2].

В этой связи как направления комплексных научных разработок выдвигаются: 1) создание теории безопасности и методов оценки приемлемого риска как научной основы предотвращения техногенных аварий и катастроф при создании и эксплуатации СТС; 2) развитие новых методов прогнозирования и оценки опасности возникновения стихийных бедствий, способов и критериев снижения негативных последствий от природных и природно-техногенных катастроф; 3) обоснование требований, нормативов и создание учебно-методической базы по обеспечению безопасности с учетом роли «человеческого фактора».

В настоящее время признано, что исследование безопасности и риска систем «человек — машина — среда» может быть адекватно проведено в рамках системы «потенциально опасный объект — средства и меры защиты — опасные и вредные факторы — человек», которую можно представить в следующем виде (рис. В.1) [41].

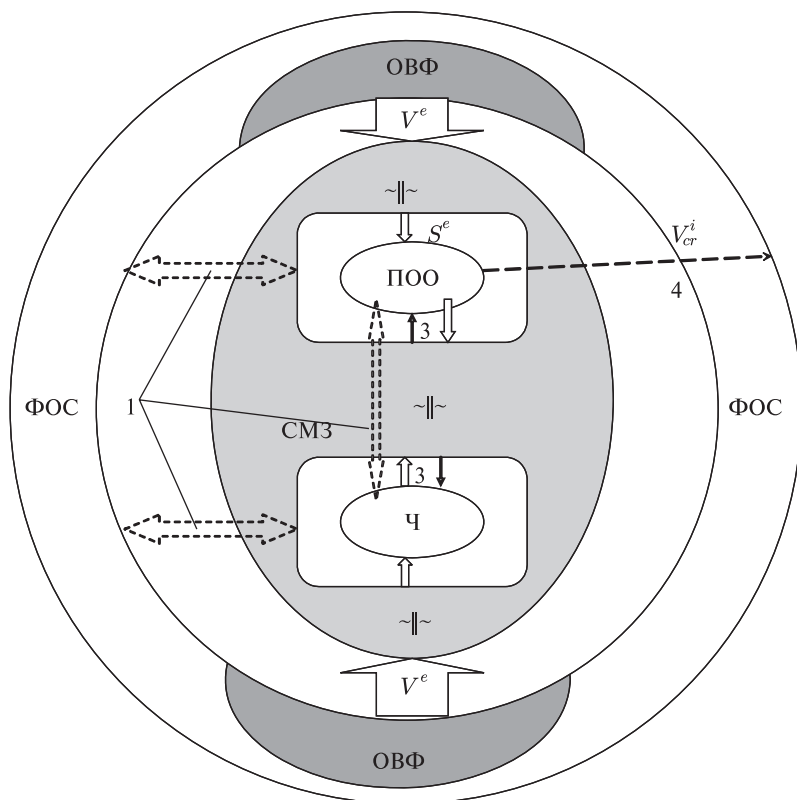


Рис. В.1. Структура системы «факторы окружающей среды (ФОС) (опасные и вредные факторы (ОВФ)) — средства и мероприятия защиты (СМЗ) — потенциально опасный объект (ПОО) — человек (Ч)», где 1 — функциональные связи; 2 — паразитные каналы для ОВФ  $V^e$ ; 3 — нерегулируемые воздействия; 4 — аварийные воздействия  $V_{cr}^i$ , образуемые ПОО для окружающей среды или/и других систем

В области моделирования и оценки безопасности (риска) потенциально опасных объектов и производств в мире разработаны и применяются два подхода: детерминированный (нулевого риска) и вероятностный (ненулевого риска), которые способствовали расширению представлений об относительности безопасности и рождению концепции «приемлемого» риска. Вероятностный подход основывается на углублении комплекса знаний об опасностях систем и привлечении последних достижений системологии к задачам управления риском [9, 60, 62].

На основе известных методологий построены такие информационные технологии, как Система Автоматизированного Моделирования БезОпасности (САМБО), разработка Института проблем машиноведения, г. Санкт-Петербург, 1993–1998 гг. [48, 62], технология вероятностной оценки безопасности (Probability Safety Assessment (PSA) technology), немецко-американский проект (разработка 1994 г. и модификация 1998 г.) [65], программный комплекс А. С. Можаяева и «Методика автоматизированного структурно-логического моделирования для вероятностного анализа и расчета показателей надежности и безопасности» [67–68].

Известно, что оценка вероятностных показателей безопасности и риска получила развитие на основе «частотного» и «гипотетического» подходов [9, 14, 16, 26, 34]. При этом в рамках «частотного» подхода констатируется фактическая реализация происшествий с отображением условий их возникновения [51, 52]. При «гипотетическом» подходе используют гипотезы о функциях распределения вероятности, о параметрах системы и характеристиках случайных процессов в ней. Следует отметить, что применительно к недостаточно изученным системам «человек — машина — среда» использование этих подходов может сопровождаться методической погрешностью расчета вероятности, которая может превышать искомое истинное значение на несколько порядков [1, 48].

Для примера рассмотрим следующую задачу. Существует качественная (обстоятельства и условия) и количественная (число) характеристика происшествий. Пусть имеется информация об  $n$  происшествиях, произошедших в организационно-технической системе, содержащей  $N$  потенциально опасных объектов. Требуется найти вероятность возникновения происшествия указанного вида на одном конкретно взятом ПОО при: а) соблюдении технических условий и б) несоблюдении одной конкретной группы  $v$  требований безопасности.

Первую часть задачи решают следующим образом:  $p = n / N$ . Если удастся провести анализ вклада в факт конкретного вида происшествия отдельной группы предпосылок ( $v$ ), то «частотная» вероятность с учетом вклада предпосылок определяется как:  $p_v = n_v / N$ .

Как видно, расчет вероятности и анализ вклада предпосылок в её значение производится пассивно, т. е. только по результатам реализации происшествия, что применительно к системам с высоким прогнозируемым значением риска или невозможно, или явно не удовлетворяет требованиям предупредительно-профилактической стратегии обеспечения безопасности. Кроме того, на практике часто остаются неизвестными: комплекс факторов, который способствовал реализации конкретного происшествия, текущее состояние ПОО, а также образование объектом вторичных факторов. Как правило, в авариях и катастрофах именно образование комплекса вторичных факторов и их воздействие на объект обуславливает критические исходы.

Очевидно, что пассивный подход к анализу и оценке безопасности не позволит также решать задачи по обоснованию мероприятий и средств безопасности и защиты для достижения требуемого значения вероятности невозникновения происшествия. Например, в настоящее время в России фактическое значение вероятности пожаров составляет  $4 \cdot 10^{-4}$  пожаров в год [2], тогда как требуемое значение установлено как  $10^{-6}$ .

Отмеченные выше недостатки устраняются путем разработки и применения активных подходов в анализе и оценке безопасности, к которым относится, в частности, логико-вероятностный метод установления вероятности происшествий. Этот метод берет начало в трудах отечественных ученых, таких как П. Порецкий, Н. Стрелецкий, В. Болотин, Д. Поспелов, И. Рябинин, Е. Соложенцев, В. Острейковский.

Применительно к исследованию безопасности реакторов АЭС впервые в 1967 г. этот метод получил свое выражение в задаче Фармера [2]. Основой логико-вероятностного метода расчета вероятности происшествия служит событийный (ситуационный) подход в моделировании инициирующих и результирующих событий. Однако основной проблемой, препятствующей полному применению этого метода к анализу сложных и (или) уникальных систем, И. Рябинин называет проблему исходных данных в форме вероятностей инициирующих событий [9]. При этом в работах [1, 16, 52, 61] указывается на то, что мало внимания уделено физикотехническому и конструкторскому анализу средств и мероприятий защиты, а также роли параметрических критериев в описании предпосылок происшествий и отказов. А ведь именно здесь можно произвести углубление анализа и моделирования безопасности и риска [140, 142]. Рассмотрим используемую для анализа системы «человек — машина — среда» формулу дифференциального риска [9, 27]:

$$R_U = p \times U, \quad (\text{B.1})$$

где вероятность  $p$  есть функция от воздействий на машину, как со стороны человека и среды, так и собственно на «саму себя»; ущерб  $U$  есть функция от потенциальных воздействий, которые способна создать машина на среду и человека и, что особенно важно, на систему другого уровня. Другими словами, более корректным видится представление риска как функции с рассмотрением двух систем, например  $C1$  и  $C2$ . Причем риск нанесения ущерба системе  $C2$  со стороны системы  $C1$  есть функциональная зависимость вида:

$$R(1 \rightarrow 2) = f(p(1), U(1 \rightarrow 2)). \quad (\text{B.2})$$

При определении этой зависимости обязательной является детализация: какие воздействия возникают внутри системы  $C1$  и проявляются применительно к системе  $C2$ , какие значения параметров они имеют, ка-

кова чувствительность (восприимчивость, несущая способность) обеих систем к этим воздействиям и в каких исходных («стартовых») состояниях находятся эти системы по отношению к внешним инициирующим воздействиям.

Из этого следует вывод о том, что не следует механически разделять процесс установления вероятности и ущерба и применять зависимость (В.1) только по отношению к одной отдельно взятой системе. Кроме того, важным оказывается (рис. В.1):

- 1) с позиции самого нежелательного исхода выявить предпосылки и связи между ними;
- 2) описать защитные и инициирующие свойства элементов систем С1 и С2, а также взаимообусловленность этих свойств;
- 3) описать эти свойства, предпосылки и связи в виде сопоставимых параметров и функций.

Если удастся такое описание, то мера определенности возникновения происшествия может быть получена в виде четкой меры — меры необходимости [11, 12]. Если исходные данные представлены как случайные величины и процессы и при этом выявлен полный набор всех предпосылок и их связей, а также выполнены условия нормировки для всех случайных величин (что на практике недостижимо), — то мера определенности возникновения происшествия может быть получена в виде вероятностной меры [26, 30]. Если исходные данные о системах имеют нечеткий и неполный характер (что часто бывает на практике), — то мера определенности возникновения происшествия может быть получена в виде нечеткой (возможностной) меры [10–13, 18].


Как правило, в условиях стоимостных и (или) временных ограничений на получение информации исходные данные о системе характеризуются как нечеткие и (или) неполные. Вследствие этого применение известных методологий для количественной оценки безопасности (риска) может быть или некорректным, или недостоверным. Это может привести или к недооценке угроз, или к неоправданно высоким затратам на обеспечение безопасности (приемлемого уровня риска), особенно если число предпосылок (термов) опасности в системе превышает сто, а данные о свойствах компонент системы представлены неполно и (или) нечетко. На примере пожарной безопасности можно констатировать <sup>viii</sup> [1], что в целом ряде случаев погрешность расчета риска существующими вероятностными методами требуемого (приемлемого) значения превышает это значение на три порядка!

К трудностям и недостаткам применения детерминированной и вероятностной методологий для оценки риска уникальных систем можно отнести следующие, см. также табл. В.1 и рис. В.2:

1. Отсутствует статистика активных отказов ПОЭ или данных для обоснования характеристик гипотетических функций их вероятности.
2. Существуют сложности в определении и описании полной группы **ситуаций** в системе и, вследствие этого, оценка по экстремальным ситуациям (максимальным проектным авариям) может быть неполной и (или) недостаточно достоверной.
3. Признается неизбежность наличия приближенных и (или) недостоверных данных об объекте, нерегламентированных факторах и трактах их распространения и, тем не менее, отсутствуют методы, позволяющие
  - а) учитывать нечеткую информацию и
  - б) рассчитывать показатели безопасности и риска.
4. Отсутствуют общие модели для группы показателей «эффективность — безопасность — стоимость» с целью определения «приемлемого» риска и (или) обоснования их оптимального баланса.
5. Невозможность в рамках этих подходов нестатического нахождения мер определенности (неопределенности) реализации происшествия и самого нежелательного исхода (СНИ) в системе.

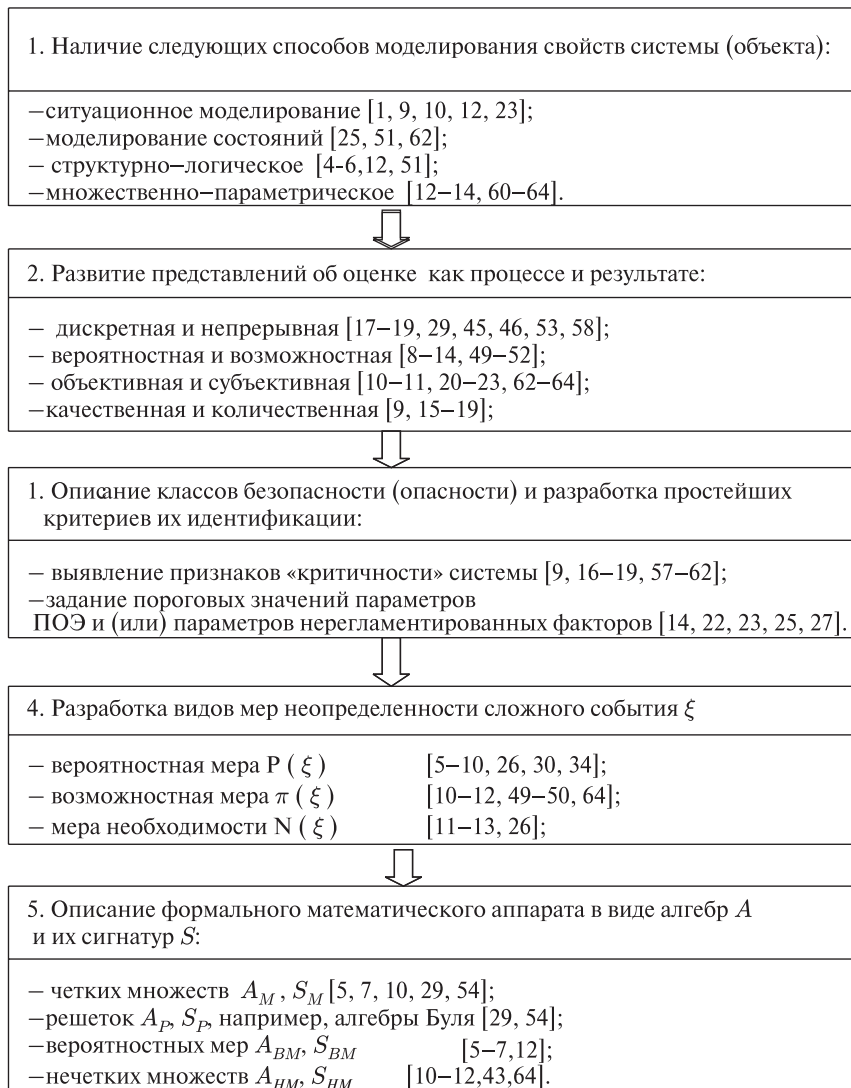
Таблица В.1

Сравнительная характеристика методологий оценки безопасности сложной технической системы (СТС)

1. Методология детерминированной оценки безопасности (АВПКО, «Традиционные меры»)	2. Методология вероятностной оценки безопасности (PSA, САМБО)
1. <sup>ix</sup>  Построение полной группы источников и приемников, факторов и каз в опасности	
2. Анализ неполной группы по выбранным «определяющим» элементам	2. Построение логической модели СНИ на основе ЛМ отказа ПОЭ (определяющих событий)
3. Метод экстремума показателей, экстремальных ситуаций	3. Определение вероятностной модели СНИ по формам и правилам перехода
4. Методы решения по максимальной проектной ситуации	4. Расчет значений вероятностной меры СНИ. Определение «значимых» связей и весов событий (отказов элементов)



<u>Результат:</u> Проект безопасной СТС при выбранных экстремальных показателях относительно СНИ	<u>Результат:</u> 1. Проект безопасной СТС с учетом выявленных значений связей и весов. 2. Частотное или гипотетическое обоснование риска нанесения ущерба и стратегии баланса показателей «эффективность — безопасность — стоимость»
---	---

Рис. В.2.<sup>\*</sup>

Отметим также существующие ограничения в применении известных детерминированной и вероятностной методологий для расчета меры определенности возникновения происшествия (МОВП):

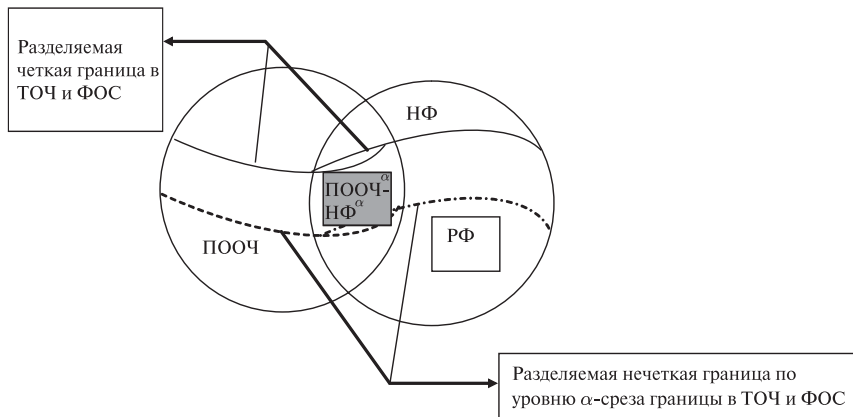
- 1) стоимость расходов на получение исходных данных ограничено,  $C \leq C_{зад}$ ;
- 2) время получения исходных данных ограничено,  $\tau \leq \tau_{тр}$ ;
- 3) вероятности «инициирующих» событий неизвестны;
- 4) исходные данные о параметрах системы нечеткие;
- 5) для асимптотических значений неизвестны зависимости между показателями «эффективность — безопасность — стоимость» и, вследствие этого, трудно установить оптимальность затрат на безопасность при заданном уровне эффективности.

**Научной целью** данной работы является исследование условий установления *асимптотических значений риска* сложных систем, а также обоснование и разработка методологии факторного параметрического моделирования и возможностной оценки риска.

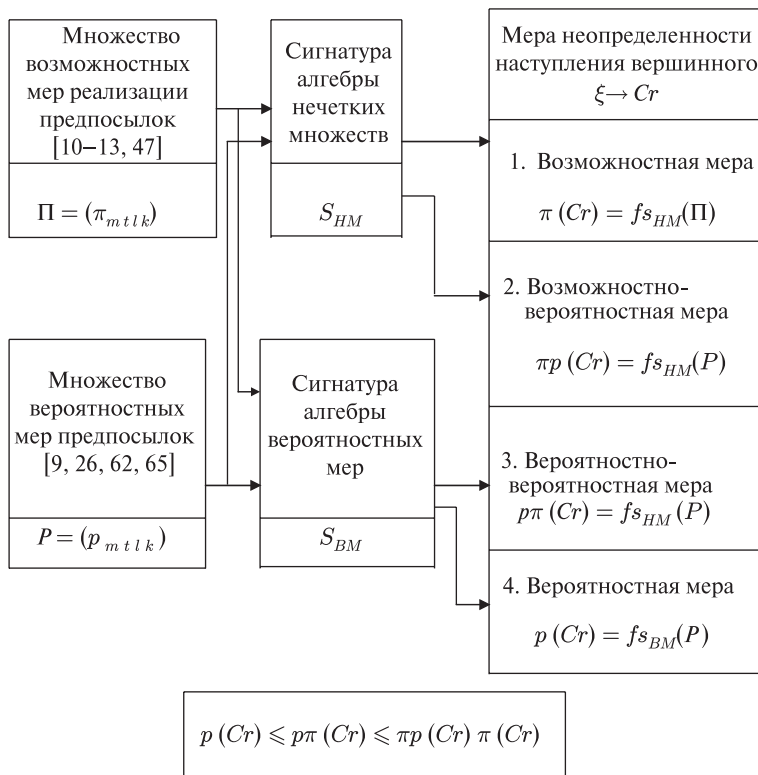
Для достижения указанной цели исследований **научная проблема**, которая решается в этой работе применительно к уникальным системам различной физической природы, есть *проблема* разработки *методологии* моделирования потенциальной опасности и возможностной (нечеткой) оценки риска, лингвистическая формулировка которой имеет вид: по заданной полной структуре системы «потенциально опасный объект — опасные и вредные факторы — средства и мероприятия защиты — человек» в условиях нечетких исходных данных об изменяющихся во времени параметрах защитных и иницирующих свойств как компонентов системы, так и причинно-следственных связей, обусловленных учитываемыми нерегламентированными факторами и паразитными каналами в системе, определить возможностную меру возникновения происшествия как наиболее нежелательного исхода взаимовлияния рассматриваемых свойств и связей и обосновать решения по выбору средств и мероприятий защиты для достижения приемлемого риска.

**Предпосылками** для разрешения поставленной проблемы являются следующие положения (см. также рис. В.3, В.4):

1. Утверждение Поспелова—Клира—Прада о соотношении вероятностной и возможностной мер наступления сложного события или возникновения процесса [10–12].
2. Наличие стандартной классификации всех возможных опасных и вредных факторов [1, 27].
3. Предположение о полноте лингвистического и множественно-параметрического описания свойства «безопасность — опасность» системы [12–14.23]<sup>xi</sup>
4. Гипотеза о соответствии событийного и множественно-параметрического способов моделирования предпосылок опасности [10–12, 49, 64].



**Рис. В.3.<sup>xii</sup>** Описание нечеткой области «ТОЧ<sup>α</sup> — НФ<sup>α</sup>» возможных происшествий в теме вида «Технический объект и человек (ТОЧ) — факторы окружающей среды (ФОС)», где РФ — регламентированные факторы, НФ — нерегламентированные факторы

Рис. В.4<sup>xiii</sup>

**Постановка научной проблемы.** Рассматриваются сложные системы вида «потенциально опасный объект — опасные и вредные факторы — средства и мероприятия защиты — человек» (ПОО — ОВФ — СМЗ — Ч). В системах не исключаются возникновения происшествий и аварий.

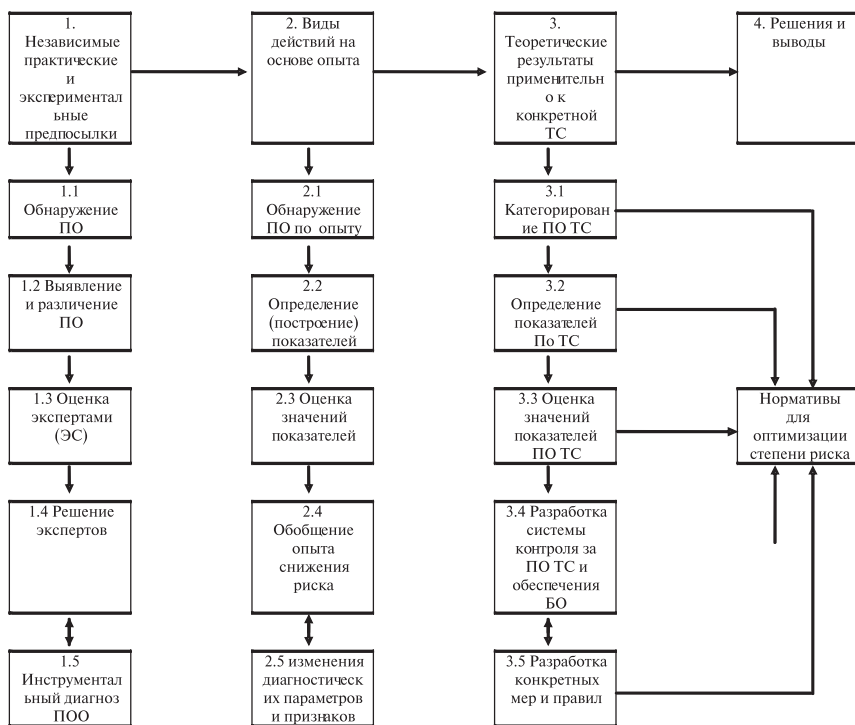
Пусть дана сложная техническая система (СТС1) «ПОО — ОВФ — СМЗ — Ч», с известной структурой связей относительно самых нежелательных исходов (СНИ), множество которых обозначим  $Cr$ .

Известны области ОВФ, множество параметров которых обозначим  $V^e$ . Известны характеристики конструкции и защиты объекта, которые опишем множеством  $F$  параметров преобразования. Описаны области параметров чувствительности, восприимчивости и несущей способности элементов и человека, множество которых обозначим  $R$ . Установлены иницирующие свойства потенциальных элементов объекта, которые описаны множеством параметров вторичных факторов  $V^i$ . Выявлены возможные паразитные каналы распространения внешних и вторичных факторов в

системе. В общем виде указанная исходная информация о системе представляется нечеткими величинами (параметрами), а повышение точности и полноты информации требует дополнительных материальных и временных затрат.

**Требуется** при условии стоимостных и временных ограничений на получение и обработку исходной информации определить интегральный риск  $R_U$  системы и обосновать выбор средств и мероприятий защиты, а также правила и решения для управления риском и достижения приемлемых его значений.

Предполагается, что в любой системе текущее (исходное) состояние  $\xi$  безопасности определяется четкой областью носителей параметров и функций указанных множеств, а возможность возникновения СНИ, как переход системы из состояния  $\xi$  в критическое и (или) надкритическое состояние  $Cr$ ;  $\xi \rightarrow Cr$ ; — их нечеткими областями существования, образуемыми границами 1, 2, 3 (рис. В.5).



**Рис. В.5. Схема количественной оценки показателей опасности (ПО) и анализа безопасности (БО) технической системы (ТС) [19]**

Пусть из рассматриваемого класса систем задана конкретная сложная техническая система СТС1, исходные данные о которой представлены в форме совокупности нечетких множеств  $V1$ ,  $F1$ ,  $R1$ . Задано множество  $V1^{AC}$  значений факторов, характеризующих опасность этой СТС1 для окружающей среды (других систем) и известно, что выполняется условие  $V1_{Cr}^i \subseteq V1^{AC}$ .

**Требуется** при стоимостных  $\$ \leq \$_{\text{зад}}$  и временных  $\tau \leq \tau_{\text{тр}}$  ограничениях на процесс подготовки и обработки исходных данных о системе СТС1 относительно выбранного исхода  $Cr$  идентифицировать *класс*  $\xi$  безопасности системы и установить *возможностную меру* перехода  $\xi \rightarrow Cr$  этой системы в критическое состояние:

$$\text{Pos}(\xi \rightarrow Cr) = \text{Pos}(F1(V1) \cap R1 \neq \emptyset \mid V1_{Cr}^i \subseteq V1^{AC}). \quad (\text{B.3})$$

Результатами решения научной проблемы являются:

- 1) **классификация и различение** состояний безопасности (опасности) системы;
- 2) **определение асимптотического значения вероятности** возникновения происшествия или аварии в системе как основной компоненты риска.

Пути решения данной проблемы связаны с решением следующих **частных задач**:

- 1) выбор и обоснования лингвистической и множественно-параметрической моделей риска системы «человек — машина — среда» на основе представления предпосылок (термов) происшествий в виде формулы: «воздействие — каналирование — ослабление — восприимчивость — инициирование»;
- 2) доказательство эквивалентности событийного и множественно-параметрического способов моделирования происшествий в системе;
- 3) разработка критериев для выявления и ранжирования предпосылок опасности в системе;
- 4) установление полной логической формы функции связности предпосылок относительно исхода — аварии;
- 5) вывод зависимостей возможностной меры реализации элементарных предпосылок исходов;
- 6) разработка метода установления возможностной меры возникновения происшествия (аварии) в системе по нечетким данным её факторной параметрической модели системы<sup>xiv</sup>;
- 7) разработка дистанционных способов получения исходных данных, желательно, в стандартной форме, характеризующей, в первую очередь, результаты измерения напряженно-деформированного состоя-

- ния корпусов элементов, а также параметров механических и тепловых возмущений;
- 8) установление и обоснование различимости возможностной меры на уровне  $10^{-6}$  при уровнях различимости  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  нечетких исходных данных о системе;
  - 9) разработка требований к проекту экспресс-экспертизы безопасности (риска) и мониторинга ресурса многофакторной структурно-сложной системы.

**Прагматической целью** проекта является разработка новой методики и информационной технологии оценки безопасности (риска) потенциально опасных систем, удовлетворяющей следующим требованиям (см. также рис. В5):

1. Объект оценки — многофакторная структурно сложная техническая система с известными погрешностями представления ее параметров.
2. Вид и результат оценки — качественно-количественный, инвариантный для любых разнородных систем с установлением: а) класса  $\xi$  безопасности системы; б) меры определенности происшествия как количественной меры перехода системы из класса  $\xi$  безопасности в критическое или аварийное состояние  $Cr$ ; в) значений  $V$  параметров факторов, определяющих переход  $\xi \rightarrow Cr$ .
3. Для проведения оценки системы производится полновариантное моделирование возможных предпосылок происшествия (отказов потенциально опасных элементов), прямо и (или) косвенно определяющих самый нежелательный исход (происшествие) в системе.
4. Должна обеспечиваться совместимость и согласованность с известными (детерминированной и вероятностной) методами оценки безопасности.
5. Должна быть предусмотрена адаптация к информационным технологиям типа САМБО, АВПКО, PSA, FMECA [62, 65–68].



<sup>xv</sup>Безопасность объекта ни-  
когда не может быть доказана  
рамках самого объекта



*По Гёделю*

## РАЗДЕЛ 1

---

### **Теория факторного параметрического моделирования безопасности (опасности) систем вида «защита — объект — среда» (ЗОС)**

#### **1.1. Теоретико-лингвистическая формулировка проблемы**

Целью раздела 1 является разработка факторного параметрического способа моделирования риска системы вида «защита — объект — среда» (ЗОС), которая детализируется как система вида «потенциально опасный объект — средства и мероприятия защиты — опасные и вредные факторы» (ПОО — СМЗ — ОВФ). Рассматривается доказательство его эквивалентности событийному способу моделирования опасностей. Кроме того, вводятся факторный параметрический и булевый базисы системы. На их основе вводятся критерии классификации, дифференциации и ранжирования состояний безопасности и опасности системы.

##### **1.1.1. Разработка понятийного аппарата для моделирования безопасности и риска системы**

Исследуем свойство «безопасность — опасность» сложной технической системы в рамках представления этой системы в виде «потенциально опасный объект — средства и меры защиты — опасные и вредные факторы» (рис. 1.1). Для этого используем общие принципы системного анализа



ров  $\Omega$ , срабатывания функциональных элементов по заданному алгоритму и формирования рабочих выходных реакций, описываемых множеством параметров  $\Xi$ .<sup>xvii</sup>

Объект относится к классу объектов повышенной опасности и содержит потенциально опасные элементы, к которым относятся некоторые функциональные элементы и энергетический узел 3.

Пусть объект и его элементы являются сложными многофакторно восприимчивыми устройствами. В составе объекта пронумерованы по возрастанию опасности в виде множества  $K$  потенциально опасные элементы,  $K = (1, 2, \dots, kK)$ . Причем последним,  $k = kK$ , нумеруется самый опасный (критический) ПОЭ. Пусть каждый ПОЭ в общем случае восприимчив к действию различных видов физических факторов, образующих множество видов  $T = (1, 2, \dots, tT)$ .

Предположим, что при несанкционированном отказе любого ПОЭ реализуется потенциальная опасность, высвобождается энергия и образуются физические факторы нескольких видов. Такие физические факторы назовем *вторичными*.

Пусть известно, что из окружающей среды на объект и внутри объекта могут действовать опасные и поражающие (вредные) факторы, под параметрами которых в данной работе будем представлять процессы (функции от времени), которые в общем случае имеют нечеткие значения (вследствие неточной и (или) неполной информации) и задаются в виде множества:

$V = (v_{m \ t \ l})$ , где  $v$  — зависящее от времени нечеткое значение параметра  $m$  вида,  $m \in M$ , характеризуемого функцией принадлежности  $\mu_v(\lambda)$  и описывающего фактор  $t$  вида,  $t = 1, 2, \dots, tT$ , действующего от  $l = 0, 1, 2, \dots, kK$  источника, причем  $l = 0$  означает внешний источник (окружающую среду), а остальными источниками являются потенциально опасные элементы объекта.

Пусть известны защитные функции конструкции и средств безопасности объекта, которые в общем случае есть функции от времени и описаны нечетко из-за наличия погрешностей в их определении. Множество нечетких функций ослабления при передаче различных видов воздействий от источников непосредственно на входы (на конструкцию) каждого ПОЭ задается в виде:

$F = (f_{m \ t \ l \ k})$ , где  $f$  — зависящее от времени нечеткое значение коэффициента ослабления,  $f \in [0, 1]$ , описанного функцией принадлежности  $\mu_f(v) \in [0, 1]$ , параметра  $m$  вида, представляющего  $t$  вид материального фактора, действующего от  $l$  источника на вход  $k$  ПОЭ.

Предположим, что в системе все матрируемые предпосылки происшествий есть предпосылки несанкционированных отказов ПОЭ и их можно однозначно выразить на основе лингвистической формулы [38, 40]: «воздействие — каналирование, ослабление или исключение видов фак-

торов — восприимчивость действующих факторов ПОЭ — инициирования элемента — образование вторичных факторов».

Пусть возможность несанкционированного инициирования любого ПОЭ объекта описывается зависящими от времени нечеткими параметрами восприимчивости к инициированию (из-за неточной и неполной информации о них), выраженными в размерности воздействующих факторов и которые задаются в виде:

$R = (r_{m \ t \ k})$ , где  $r$  — в общем случае зависящий от времени нечеткий параметр  $m$  вида, описываемый функцией принадлежности  $\mu_r(\lambda)$ , представляющий  $t$  вид фактора, который воспринимает  $k$  ПОЭ.

Тогда относительно любого ПОЭ объекта объединение введенных множеств в совокупность множеств (СМ) вида

$$CM = \{V, F, R\} \quad (1.1)$$

позволяет на некотором периоде времени полностью описать возможные источники и предпосылки происшествий и элементарных отказов.

Назовем предпосылки, источники и *их связи* в системе, описывающие возможность образования элементарных отказов, *причинами или предпосылкам опасности*.

Назовем взаимосвязи предпосылок относительно выбранного исхода (аварии или отказа критического ПОЭ) *функциями опасности*.

### 1.1.2. Принципы системного анализа предпосылок и функций опасности

Классифицируем систему «ПОО — ОВФ — СМЗ» как открытую сложную систему и проведем её описание на высшем уровне [14, 70], что отвечает требованиям полноты и общности системного анализа.

На лингвистическом уровне описания системы [11, 14] более детально выявим *предпосылки* и *функции* опасности. К *предпосылкам* отнесём:

- 1) все элементы объекта — источники потенциальной опасности, называемые далее потенциально опасными элементами (ПОЭ), учитывается, что ПОЭ обладают способностью образовывать при несанкционированном энерговыделении вторичные факторы, способные нанести ущерб как собственно объекту, так и окружающим его системам (среде);
- 2) внешние факторы, действие которых на ПОО способно инициировать его элементы к активному отказу;
- 3) каналы передачи нерегламентированных факторов, характеризующиеся как паразитные и неустраняемые.

К функциям опасности отнесём:

- 1) все возможные связи между предпосылками опасности, приводящие (способные привести) к активному отказу хотя бы одного ПОЭ (учитывается дифференциальный аспект связей);
- 2) структуру (дерево) связей между предпосылками относительно одного (самого опасного или критического) исхода происшествия (учитывается интегральный аспект связей).

Для оценки риска системы необходимо выразить *предпосылки* и *функции* в аналитическом виде, что можно сделать на примере теоретико-множественного и логического описания активного отказа в техногенной системе (рис. 1.1).

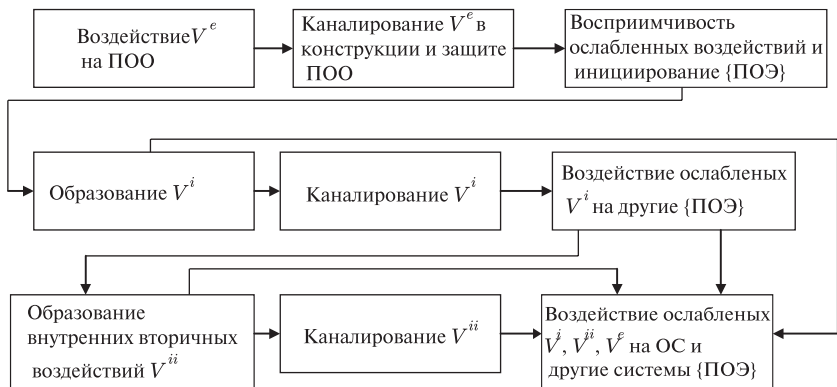
*Понятие активного отказа ПОЭ.* Определим активный отказ как событие перехода элемента (объекта) в критическое состояние, при котором частично или полностью высвобождается его полная (потенциальная и (или) кинетическая) энергия [38, 41]. С точки зрения безопасности системы — активный отказ всегда нерегламентированное событие (происшествие). С точки зрения потенциальной опасности активный отказ — основная модель, применяемая для исследования и оценки показателей безопасности и опасности.

Очевидно, что активный отказ (АО) элемента является частью (фрагментом) всех процессов, происходящих в объекте. Отказы могут накапливаться и в конце концов привести к отказу всего объекта. Например, при активном отказе в виде взрыва объекта, сопровождаемом изменением фазового состояния самого энергоёмкого материала этого объекта, могут порождаться и накапливаться активные отказы его элементов (относительно медленные тепловые, термодинамические и химические реакции).

На основе [9, 40, 55] установим, что происшествие в системе есть *условный алгоритм* возможных явлений: «воздействие факторов на объект — их каналирование в конструкции объекта — восприимчивость факторов элементами — инициирование элементов — образование вторичных факторов — их каналирование внутри и выход наружу — воздействие на другие ПОЭ — образование новых вторичных факторов — воздействие вторичных факторов на окружающую среду» (рис. 1.2).

Такое определение происшествия позволяет формализовать все *причины* и *предпосылки* опасности, а также представлять их в множественно-параметрической и в решётчатой или структурно-логической (раздел 2) форме. А на основе этого — определять критерии опасности.

Тогда модель эволюции аварийной ситуации (перехода системы) в самый нежелательный исход — аварию — есть в общем смысле множество (дерево) алгоритмов, описывающих конечное число активных отказов элементов объекта (рис. 1.2).



**Рис. 1.2. Алгоритм (дерево) явлений, происходящих в системе « $V^e$  — СМЗ — ПОЭ»**

*Частные принципы моделирования опасности.* На основе моделей активного отказа и происшествия в данной работе формулируются и разрабатываются следующие частные принципы моделирования опасности в техногенной системе [38–41, 71, 82]:

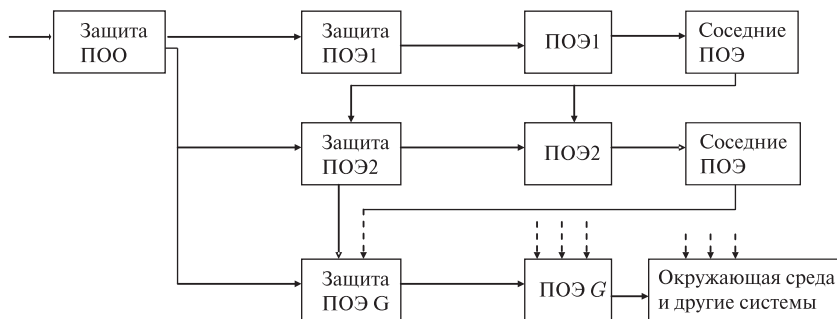
1. Принцип первопричины аварии. Предпосылок к аварийной ситуации на объекте не будет создано, если из окружающей среды не воздействуют нерегламентированные факторы.
2. Принцип учёта полного набора возможностей:
  - 2.1. Рассматривается весь набор (множество) физических факторов и потенциально опасных элементов (ПОЭ), которые могут действовать на объект и эти элементы.
  - 2.2. Учитывается весь набор вторичных физических факторов и эффектов, которые могут образоваться вследствие активных отказов опасных элементов.
  - 2.3. Описывается конечное число возможных последовательностей, составленных из фрагментов системы типа: «потенциально опасный элемент — ПОЭ1 — конструкция объекта — защита объекта и элементов — ПОЭ2—...—критический ПОЭ объекта — конструкция объекта — окружающая среда» (рис. 1.3).
  - 2.4. Анализируются и выбираются полные множества параметров воздействия и восприимчивости, которые определяют (способны определять) активный отказ ПОЭ.
3. Принцип возможности активного отказа. Из видов отказа элемента: повреждения, поражения, разрушения и т. п. — с точки зрения опасности выбирается и исследуется вероятный либо маловероятный, но возможный активный отказ.

4. Принцип реализации активного отказа. Самым минимальным алгоритмом активного отказа принята условная последовательность процессов: «воздействие — каналирование — восприимчивость — инициирование».
5. Принцип параметрического несанкционированного инициирования ПОЭ. За критерий несанкционированного инициирования ПОЭ принимается условие превышения входных по отношению к элементам объекта параметров  $s$  процессов воздействующих факторов над значениями параметров  $r$  процессов их восприимчивости:

$$s \geq r \rightarrow v^i \in v^{cr}, \quad (1.2)$$

где  $v^i$  и  $v^{cr}$  — соответственно параметр (процесс) вторичного фактора и его значение, критичное для окружающей среды (соседних ПОЭ).

6. Принцип допущения о неизбежности «паразитного» каналирования. Физические факторы могут проникать к потенциально опасным элементам через конструкцию объекта (паразитно каналировать) и изоляция от них или невозможна, или требует чрезмерных затрат.
7. Принцип инверсионной роли элементов. Потенциально опасные элементы ТО рассматриваются как приёмники и потенциальные источники физических факторов (вторичных воздействий).
8. Принцип многофакторности. Источники, приёмники и каналы передачи в системе в общем случае могут являться многофакторными.
9. Принцип предопределённости аварийной ситуации, который формулируется следующим образом. В рамках известных представлений эволюция аварийной ситуации может быть представлена как последовательность активных отказов элементов, а с точки зрения глубины безопасности системы — как конечное множество безопасных состояний и переходов между ними до достижения критического (предельного) состояния объекта.
10. Принцип упрощения по первому производному фактору. Принимается, что наряду с внешними факторами в эволюции активных отказов элементов в объекте участвуют (могут участвовать) только вторичные факторы. Вторичные факторы от вторичных источников (активный отказ элемента, считающегося уже отказавшим), т. е. третичные факторы (третичный отказ), не учитываются.
11. Принцип объединения воздействующих факторов. Относительно любого ПОЭ внешние и вторичные факторы объединяются по видам факторов и по видам параметров факторов. При этом в пределах совпадающих их видов значения параметров алгебраически суммируются.



**Рис. 1.3. Структура взаимодействия компонентов системы**

В результате рассмотренных принципов и понятий применительно к системе «защита — объект — среда» дадим следующее определение безопасности.

*Безопасность* это свойство системы с определенной (заданной) *вероятностью* не допустить или исключить возникновение происшествия, за которое, например, принимается активный отказ самого критического потенциально опасного элемента объекта.

В данной работе также рассматривается, что возникновение *происшествия* — это *самый нежелательный исход* сложившихся внутри системы обстоятельств и предпосылок, нашедших свое выражение в виде значений совокупности множеств.

Причем далее будем под исходным (текущим) *классом* безопасности понимать состояние безопасности системы, которое полностью определяется исходными (заданными) *четкими* значениями (ядрами или математическими ожиданиями) параметров и функций факторного параметрического базиса системы. Тогда как *вероятность* перехода из исходного класса безопасности в критическое и «закритическое» состояние системы по большей части связана с *нечеткостью* и (или) *неполнотой* значений параметрической модели.



## 1.2. Построение факторного параметрического базиса системы

### 1.2.1. Обоснование эквивалентности ситуационного и множественно-параметрического описания опасности в системе

Если применительно к известной совокупности ПОО различной физической природы выразить и найти такую совокупность множеств, чтобы на её основе с учетом действия факторов любой окружающей среды оказалось достижимым унифицированное описание предпосылок опасности, то это позволит анализировать любую аварийную ситуацию и аварию в рассматриваемой системе. С этой целью детализируем описание совокупности множеств системы (формула 1.1) путем введения опорных множеств и булевых подмножеств её элементов.

Рассмотрим и пронумеруем основные виды материальных (физических) факторов: 1 — механический (гравитационный); 2 — тепловой (термодинамический); 3 — электрический (электромагнитный); 4 — радиоактивный (ионизационно-корпускулярный); 5 — <sup>xx</sup>фооновый (рентгеновское и гамма-излучения); 6 — оптический (волны инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения); 7 — химический (реакции горения, восстановления и др.); 8 — биологический (бактериологические, физиологические реакции и др.); 9 — факторы других видов, например, психотропные и психофизиологические.

Образует опорное множество видов факторов:

$$OT = (o_t), \quad (1.3)$$

где  $o$  — логическая переменная,  $o = 0 \vee 1$ ,  $t$  — номер вида фактора,  $t \in T$ ,  $T = (1, 2, \dots, tT)$  — множество номеров факторов,  $tT = 9$  — установленное здесь количество видов факторов.

Известно, что каждый из рассматриваемых факторов может быть описан совокупностью видов параметров.

В физике принята стандартная система единиц измерения физических величин (система СИ), с помощью которой выражают основные и производные виды параметров [28, 53].

Так, в частности, механический фактор ( $t = 1$ ) описывается следующими основными видами параметров (единицами СИ): *длина*, которую обозначим номером  $n = 1$ ; *масса*, обозначим номером  $n = 2$ ; *время*, номер  $n = 3$ .

Использование системы СИ позволяет выражать любые (производные) параметры любого фактора через основные виды физических величин.

Тогда, например, такие параметры, как энергия, мощность и плотность мощности, являющие собой параметры любого фактора, представляются следующими размерностями:

$$\text{Дж} = \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}; \text{Вт} = \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}; \text{Вт}/\text{м}^2 = \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}. \quad (1.4)$$

Условно говоря, в описании энергии и мощности любого фактора участвуют виды базовых параметров с номерами 1, 2 и 3. Значит, по сочетанию и количественному выражению (размерности) номеров параметров можно формально судить о содержательности любого фактора. Аналогично можно формализовать любой другой производный параметр любого фактора.

На основе множества факторов **OT** и нумерации базовых параметров этих факторов построим опорное множество видов параметров:

$$\mathbf{ON} = (o_{nt}), \quad (1.5)$$

где  $o = 0 \vee 1$  — логическая переменная **n** номера основного параметра  $t$  вида фактора,  $n = 1, 2, 3, \dots, 9$ ;  $t = 1, 2, 3, \dots, 9$ .

Назовем опорные множества **OT** и **ON** полными, если все их логические элементы равны единице:  $o_t = 1, o_{nt} = 1$ , при  $\forall t, n$ .

Очевидно, что опорные множества **OT** и **ON** удовлетворяют следующему отношению вложенности:

$$\mathbf{OT} \subset \mathbf{ON}. \quad (1.6)$$

Рассмотрим некоторую среду, в которой действуют все виды физических факторов. Пусть параметры этих факторов описываются опорным множеством **ON<sub>1</sub>**. Для этих условий докажем следующую теорему.

*Теорема о вложенности опорных множеств видов параметров и видов факторов и её следствия*

*Теорема 1.* Опорное множество **ON<sub>1</sub>** параметров *любой* совокупности физических факторов, действующих в *любой* физической среде, *всегда* вложено в полное множество видов параметров **ON**:

$$\mathbf{ON}_1 \subseteq \mathbf{ON}. \quad (1.7)$$

*Доказательство.* Согласно теории размерности [28, 53] любую физическую величину любого физического фактора можно выразить через базовые параметры. Это означает, что *любая* совокупность материальных факторов, действующих в *любой* среде, может быть представлена в виде множества параметров **ON<sub>1</sub>** и только в виде него. В свою очередь, количество и номера параметров множества **ON<sub>1</sub>** однозначно представлены в полном опорном множестве **ON** и не выходят за его рамки. Таким обра-

зом, для любых взятых множеств  $ON_1$  справедливо отношение вложенности вида  $ON_1 \subseteq ON$ .

*Следствие 1.* Любую сколь угодно сложную физическую среду, находящуюся вокруг объектов любой сложности, можно представить множеством  $ON$  базовых параметров физических факторов:

$$ON = (o_{nt}), \quad n = 1, 2, 3, \dots, 9; \quad t = 1, 2, 3, \dots, 9,$$

мощность которого  $|ON| = 81$ .

*Следствие 2.* Любую ситуацию, характеризующуюся воздействием на любой объект произвольного числа физических факторов, можно описать в рамках полного множества базовых параметров  $ON$ .

### 1.2.2. Выбор и описание опорных множеств опасных и вредных факторов

Известно, что производные параметры образуются по алфавиту базовых параметров на основе установленных физических законов и зависимостей. Число производных параметров в принципе может быть сколь угодно большим и определяется природой рассматриваемой системы, степенью её изученности, а также субъективными причинами. В ряде случаев для описания и характеристики техногенных систем достаточно использовать такие упомянутые ранее производные параметры, как энергия, мощность и плотность мощности физического фактора. Пронумеруем их переменной  $m = 1, 2, 3$  и выразим логическую переменную  $o_{mt}$  как элемент нового множества  $OM$  производных параметров физических факторов, через логическое выражение размерности  $f(o_{mt})$ , в котором участвуют логические переменные множества  $ON$ :  $o_{mt} = f(o_{nt})$ .

Например, для энергии как производного параметра с номером  $m = 1$ , применительно к любому фактору это логическое выражение уравнения размерности (1.4) принимает вид:

$$f(o_{1t}) = o_{1t} \wedge o_{1t} \wedge o_{1t} \wedge o_{3t} \wedge o_{3t} = o_{m=1t} \quad (1.8)$$

Отметим, что при построении функции  $f(o_{mt})$  используются только те логические переменные, которые выражают целое число раз базовые параметры в уравнении размерности.

На основе производных параметров физических факторов введем множество их **значений**, которое полностью описывает систему «объект — факторы обстановки»:

$$W = (w_{mtlk}), \quad (1.9)$$

где  $w$  — значение,  $w \in \mathcal{H}^1$ , производного  $m$  вида параметра  $t$  вида фактора при его распространении от  $l$  вида источника до  $k$  вида приемника. Причем  $l = 0, 1, \dots, lL$ ;  $k = 1, 2, \dots, kK$ , где  $lL$  — количество источников вторичных факторов,  $l = 0$  — номер внешнего источника физических факторов,  $kK$  — количество потенциально опасных элементов, как приемников действующих в системе факторов.

Отметим, что в общем случае множество параметров воздействий  $V$ , рассматриваемых применительно к системе «ПОО — ОВФ — СМЗ» (рис. 1.1), и множество параметров воздействий  $S$ , см. зависимость (1.11), вложены в полное множество  $W$ :  $V \subset W, S \subseteq W$ .

Опишем опорное множество производных параметров в виде  $OM = (o_{mtlk})$ , где  $o = 0 \vee 1$ . Определим, что множества  $OM$  и  $W$  характеризуются следующим отношением соответствия типа:

$$OM \rightarrow W: \text{если } o_{mtlk} = 0, \text{ то } w_{mtlk} = 0; \text{ если } o_{mtlk} = 1, \text{ то } w_{mtlk} \geq 0. \quad (1.10)$$

Очевидно, что соотношение (1.10) справедливо в рамках только одной системы «объект — факторы обстановки» и по значениям элементов множества  $OM$  можно судить о пустоте или непустоте множества  $W$ . Здесь и далее множества значений параметров считаются пустыми, если значения всех его элементов равны нулю.

Таким образом, введенные множество  $W$  и опорные подмножества  $OT$ ,  $ON$  и  $OM$  представляют собой универсальные множества номеров видов факторов, а также видов и значений параметров факторов. Их построение служит основой для создания универсальной базы исходных данных применительно к системам любой сложности и любого физического содержания.

### 1.2.3. Описание факторного параметрического базиса системы

*Введение дополненной совокупности множеств опасности*

На основе основных множеств  $V, F, R$  дополнительно введем и опишем множества, позволяющие выявлять и ранжировать предпосылки опасности.

Введем множество  $S$  в общем случае нечетких параметров факторов, непосредственно действующих на входы (на конструкцию) ПОЭ объекта,

$$S = (s_{mtlk}), \text{ где } s_{mtlk} = v_{mtk} * f_{mtlk} \quad (1.11)$$

для  $\forall m \in M, t \in T, l \in (0, 1, \dots, kK), k \in K$ .

Кроме того, введем множество  $B$  нечетких пересечений параметров воздействия и восприимчивости, такое что:

$$\mathbf{B} = (b_{mlk}), \text{ где } b_{mlk} = s_{mlk} \cap r_{mlk} \quad (1.12)$$

для  $\forall m \in M, t \in T, l \in (0, 1, \dots, kK), k \in K$ .

Объединим совокупность множеств **СМ** (1.1) с введенными производными множествами (1.11), (1.12) и представим их в виде дополненной совокупности множеств (**ДСМ**) системы:

$$\text{ДСМ} = \{V, F, R, S, B\}. \quad (1.13)$$

Если на совокупности множеств (1.13) задать операции, которые с позиции происхождения описывают связи источников и их предпосылок между собой, и назвать это объединение *базисом* множеств, то на основе такого базиса достижимо выражение всех возможных причин и предпосылок опасности.

*Введение и описание булевых подмножеств и операций для параметрического и булевого базисов*

По аналогии с описанием опорного множества **ОМ** и его отношения с множеством **W**, формулы (1.8)–(1.10), введем и опишем следующие булевы опорные подмножества:

$$\begin{aligned} \mathbf{OV} &= \{ov_{ml}\}, ov = 0 \vee 1; \mathbf{OV} \leftrightarrow \mathbf{V}, \text{ при } v_{ml} > 0, ov_{ml} = 1; \\ \mathbf{OF} &= \{of_{mlk}\}, of = 0 \vee 1; \mathbf{OF} \leftrightarrow \mathbf{F}, \text{ при } f_{mlk} > 0, of_{mlk} = 1; \\ \mathbf{OS} &= \{os_{mlk}\}, os = 0 \vee 1; \mathbf{OS} \leftrightarrow \mathbf{S}, \text{ при } s_{mlk} > 0, os_{mlk} = 1; \\ \mathbf{OR} &= \{or_{mlk}\}, or = 0 \vee 1; \mathbf{OR} \leftrightarrow \mathbf{R}, \text{ при } r_{mlk} > 0, or_{mlk} = 1; \\ \mathbf{OB} &= \{ob_{mlk}\}, ob = 0 \vee 1; \mathbf{OB} \leftrightarrow \mathbf{B}, \text{ при } b_{mlk} > 0, ob_{mlk} = 1. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Введенные подмножества предназначены для выявления причин и связей происшествий в системе по следующим признакам: 1) по совпадению видов факторов воздействия и восприимчивости; 2) по совпадению видов параметров этих факторов; 3) по пересечению значений этих параметров.

Установим, что на **СМ** (1.1), (1.13) справедливы операции алгебры множеств. Из них специально выделим операции, используемые для выявления связей между *элементарными предпосылками* на основе основных (1.1), (1.13) и дополнительных (1.4), (1.5), (1.17), (1.14) множеств системы.

1. Операция пересечения множеств:

$$\mathbf{OB} = \mathbf{OS} \cap \mathbf{OR} \rightarrow ob_{mlk} = os_{mlk} \wedge or_{mlk}; \quad (1.15)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{S} \cap \mathbf{R} \rightarrow b_{mlk} = s_{mlk} \cap r_{mlk} \text{ при } s > r: b = 1; \text{ при } s \leq r: b_{mlk} = 0, \forall m, t, l, k.$$

2. Операция алгебраического умножения элементов множества  $\mathcal{S}$ :

$$\mathcal{S} = \mathcal{F} * \mathcal{V} \rightarrow f_{mlk} \times v_{ml} = s_{mlk}. \quad (1.16)$$

Таким образом, введенные множества и операции над ними представляют собой выраженные в универсальной форме *факторный параметрический базис* системы «ПОО — СМЗ — ОВФ»:

$$\text{ФПБ} = \langle V, F, R, M, T, L, K, S_M \rangle, \quad (1.17)$$

где  $S_M$  — совокупность операций алгебры множеств и операций вида (1.15), (1.16).

### 1.3. Построение комплекса критериев для выявления булевых и параметрических предпосылок опасности

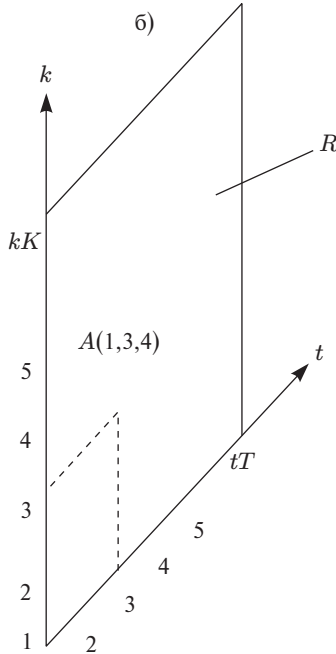
#### 1.3.1. Постановка задачи

С позиции выбранного происшествия на основании введенного факторного параметрического базиса можно учесть такие качества рассматриваемой системы, как многофакторность; наличие внешних и вторичных воздействий; существование паразитной связности элементов по воздействующим факторам; наличие и качество средств защиты и конструкции объекта. Это позволит формализовать алгоритм выявления элементарных предпосылок опасности в системе и построить для этого критерии распознавания её состояний безопасности и предпосылок происшествия. В целом такой подход оказывается продуктивным при построении интеллектуальных систем, предназначенных для оценки безопасности и риска.

#### 1.3.2. Формальное построение критериев выявления предпосылок опасности

Используем принцип дедукции. Пронумеруем потенциально опасные элементы объекта по нарастанию возможного ущерба в случае их активного отказа. Отметим, что полученное с помощью формул (1.11), (1.16) множество  $\mathcal{S}$  в общем виде представляет собой полный гиперкуб, который имеет размерность  $mM \times tT \times lL \times kK$ . На рис. 1.4 а для простоты иллюстрации множество  $\mathcal{S}$  представлено с условием, что  $mM = 1$ . Во всех узлах полного гиперкуба задаются ненулевые значения параметров. При описании некоторой конкретной системы, например, в виде «ПОО1 — ОВФ1», получают подмножество  $\mathcal{S}1$  полного множества  $\mathcal{S}$  (при этом могут быть





**Рис. 1.4. Интерпретация множества воздействий  $S$  в виде гиперкуба**

Нетрудно показать, что это условие можно представить как «последовательную конъюнкцию» четырех элементарных критериев:

$$B \neq \emptyset \rightarrow 1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge 4 \rightarrow \\ \rightarrow (m^s \cap m^r \neq \emptyset) \wedge (t^s \cap t^r \neq \emptyset) \wedge (l^s \cap k^r \neq \emptyset) \wedge (s_{mtlk} \cap r_{mtk} \neq \emptyset), \quad (1.18)$$

где критерии 1, 2, 3, 4 соответственно описывают ожидаемые совпадения видов параметров и видов факторов, номеров источников и приемников, а также пересечение нечетких параметров внутренних воздействий и восприимчивости элементов.

### 1.3.3. Построение критериев выявления логических предпосылок

На основе булевых подмножеств, зависимости (1.14), (1.15), раскроем содержание критериев 1, 2, 3, представленных в формуле (1.18). Для этого представим условие возникновения отказа самого опасного (критического) ПОЭ как условие *непустоты* пересечения множества  $S_{kK}$  параметров



воздействующих на него нерегламентированных факторов с множеством  $R_{kk}$

$$B_{kk} = S_{kk} \cap R_{kk} \neq \emptyset, \quad (1.19)$$

где  $S_{kk} = (S_{m_s t_s k = kk})$ ,  $R_{kk} = (R_{m_s t_s k = kk})$ ,  $m_s \in M_s$ ,  $t_s \in T_s$ ,  $m_r \in M_R$ ,  $t_r \in T_R$ .

Проверка выполнения условия (1.19) начинается с выяснения наличия одинаковых видов факторов среди факторов воздействия и восприимчивости. Другими словами, самым общим условием возникновения происшествия является условие существования непустого пересечения  $T$  между множеством  $T_s$  номеров видов ОВФ, непосредственно прикладываемых к выходному ПОЭ, и подмножеством  $T_R$  номеров всех видов факторов, к которым восприимчив этот элемент:

$$T' = T_s \cap T_R \neq \emptyset, \text{ где } T' = (t' = t_r = t_s), \text{ причем } T' \subset T. \quad (1.20)$$

Условие (1.20) позволяет идентифицировать те номера видов факторов, которые используются для дальнейшего анализа выражения (1.19). Назовем условие (1.20) факторным критерием (ФК) выявления причинных термов опасности в системе.

В рамках подмножества видов факторов  $T_i$  рассмотрим подмножество  $M_s$  их параметров, сравним его с подмножеством номеров  $M_R$  и определим их пересечение  $M_i$ . При этом, **если** пересечение  $M'$  непустое

$$M' = M_s \cap M_R \neq \emptyset, \quad (1.21)$$

где  $M_i = (m_i = m_r = m_s)$ , причем  $M_i \subset M$ , то номера  $m_i$  указывают те виды производных параметров, которые в дальнейшем используются для анализа выражения (1.19).

Назовем условие (1.21) видовым параметрическим критерием (ВПК) выявления опасности в системе.

Обозначим как  $T_{ii}(M_i)$  подмножество всех видов факторов, которому соответствует подмножество параметров  $M_i$ . Тогда очевидно, что между результатами анализа опасности системы по факторному и видовому параметрическому критериям имеют место следующие отношения вложенности:

$$T_{ii} \subset T_i \subset T, \quad M_i \subset M. \quad (1.22)$$

Из рассмотренного вытекает, что проверку выполнения условия (1.18) следует искать на «суженных» подмножествах  $T_{ii}, M_i$ . Это означает, что

для анализируемой системы можно сформулировать конкретный критерий наступления происшествия (КНП) в следующем виде:

$$B_{kk} = S_{ikk} \cap R_{ikk} \neq \emptyset, \quad (1.23)$$

$$\text{где } S_{ikk} = (S_{m!t!!kk}); \quad R_{ikk} = (R_{m!t!!kk}). \quad (1.24)$$

Использование «суженных» подмножеств значений параметров воздействий и восприимчивости, описанных в выражении (1.24), может значительно уменьшить априорную размерность задачи. В свою очередь, это способствует снижению затрат при поиске и оценке «значимости» всех возможных причин и предпосылок опасности.

Таким образом, в виде выражений (1.19)–(1.23) получен комплекс ранжированных критериев, позволяющий формализовать общее выражение критерия (1.18) в виде алгоритма и программы обработки значений МПБ.

## 1.4. Классификация свойства безопасности СТС на основе применения комплекса критериев

### 1.4.1. Построение критериев классификации в терминах опорных подмножеств

На основе последовательности критериев (1.19)–(1.23) в терминах опорных множеств построим критерии для оптимального выявления нарастания опасности в системе.

1. Первый шаг в этом — определение класса «абсолютно безопасная система». Словесная формулировка: этот класс безопасности имеет место тогда и только тогда, когда объект не содержит ни одного ПОЭ. В терминах опорных множеств условие его выявления имеет вид:

$$V^i = \emptyset \rightarrow v_{mtl}^i = 0. \quad (1.25)$$

2. Следующий шаг — это выявление отсутствия в объекте системы ПОЭ, восприимчивых к действию внешних нерегламентированных факторов. Соответствующий этому обстоятельству критерий имеет вид:

$$V^e \neq \emptyset \rightarrow v_{mtl}^e \neq 0, \quad OR \cap OV^e = \emptyset \rightarrow or_{mtk} \wedge ov_{mtl} = 0, 1 > 0. \quad (1.26)$$

Этот класс безопасности назовем: «*потенциально безопасная система*».

3. Третий шаг заключается в выяснении роли конструкции и защиты объекта при действии ОВФ. Рассмотрим комбинацию термов, когда элементы восприимчивы к действию возможных ОВФ, но конструкция и защита объекта исключает или полностью ослабляет эти факторы.

Критерий идентификации имеет вид:

$$\text{при } OR \cap OV^e \neq \emptyset \rightarrow OF \cap OR \cap OS^e = \emptyset \text{ и } OF \cap OR \cap OS^i = \emptyset, \quad (1.27)$$

или  $(\bigcup_l OF) \cap OR \cap (\bigcup_l OS) = \emptyset$ .

Назовем этот класс безопасности: «*относительно безопасная система*».

4. Определим четвертый класс как альтернативу классу 3. Комбинацию термов опасности установим следующим образом: условия для отказа ПОЭ существуют, но отказ критического ПОЭ невозможен. Выразим это определение в виде критерия:

$$(\bigcup_l OF) \cap OR \cap (\bigcup_l OS) \neq \emptyset \text{ для } m', t', l', k',$$

$$B' = S' \cap R' = \emptyset \rightarrow s_{mtk} \prec r_{mtk}, \quad (1.28)$$

если  $k = kK$ , то  $B'_{kK} = S'_{kK} \cap R'_{kK} = \emptyset$ .

Назовем данный класс: «*потенциально опасная система*».

5. Рассмотрим в рамках класса 4 состояния безопасности системы, при которых условия для отказа критического ПОЭ существуют и выражаются следующим критерием:


$$(\bigcup_l OF) \cap OR \cap (\bigcup_l OS) \neq \emptyset \text{ и } B'_{kK} \neq \emptyset. \quad (1.29)$$

- 5а. Рассмотрим в рамках класса 5 подкласс, характеризующий *собственную безопасность (опасность)* объекта. Иначе, существуют условия для отказа критического ПОЭ от действия вторичных факторов, которые выражены в виде:

$$B_{kK}^i \neq \emptyset. \quad (1.30)$$

Назовем эти классы соответственно: «*повышенно опасная система*» и «*собственно повышенно опасная система*».

- б) Дополнительно для характеристики опасности введем риск  $R_U$  нанесения ущерба  $U$  системе самой себе, окружающей среде или другим

системам (объектам). Если задано предельно допустимое значение риска  $R_U^{xxi}$   можно формулировать следующий критерий:

$$B'_{kk} \neq \emptyset \wedge R_U \geq R_U^I. \quad (1.31)$$

Назовем последний класс безопасности: «*чрезвычайно опасная система*».

Поскольку классы безопасности 1–6 системы формально выведены, исходя из таких её внутренних свойств, которые не затрагивают физическую сторону системы, то их можно характеризовать как универсальные, а критерии их различения считать общими. Также следует отметить, что хотя эти классы выражают приближение опасного исхода (происшествия), то, тем не менее, они определяют безопасность (безаварийность) системы.

Последним шагом в проводимом анализе является рассмотрение состояния системы после происшествия. Это событие чаще всего выражают условием вида [9, 44]:

$$U > U^I, \quad (1.32)$$

где  $U^I$  — недопустимое значение ущерба.

Таким образом, построенный в терминах опорных множеств комплекс критериев (1.25)–(1.32) классификации СТС легко формализуется и может служить универсальной основой для качественной и количественной оценки безопасности.

#### 1.4.2. Оценка эффективности полученного комплекса критериев

В заключение оценим эффективность разработанного комплекса критериев (1.25)–(1.32). Для этого сравним число причинных термов, необходимых для анализа по методу полного перебора, с числом термов, выявляемых на основе полученных критериев. Пусть априорно известно, что  $\sup T = 9$ ,  $\sup M = 5$ ,  $\sup L = 11$ ,  $\sup K = 10$ .

Тогда мощность множественно-параметрического базиса, определяющая число причин и предпосылок, составит 4950.

Пусть в результате применения критериев к анализу МПБ системы получено, что  $\sup T_{II} = 3$ ,  $\sup M_I = 3$ , и выявлен один критический ПОЭ. Это означает, что число предпосылок снизится до 99. При этом соответственно уменьшается необходимое число исходных данных, представляемых в виде значений параметрического базиса (1.17). При наличии стоимостных и временных ограничений на получение таких исходных применение разработанных критериев позволяет или найти алгоритмическое решение вообще, или снизить затраты на решение в частности.

### 1.4.3. Результаты множественной параметрической классификации безопасности сложной системы

Для оценки безопасности сложных систем и расчета показателей важной и актуальной является задача классификации и детального различения состояний безопасности системы.

Данная задача решена на основе разработанного комплекса критериев (1.25)–(1.32). Результаты определения классов состояний, характеризующих последовательное нарастание потенциальной опасности в системе «ПОО — СМЗ — ОВФ», а также критерии идентификации приведены в табл. 1.1. При этом получено и описано 6 классов безопасности, и одно состояние после происшествия. В совокупности эти классы состояний полностью описывают свойства «безопасность — опасность» любой структурно сложной системы.

## 1.5. Формулировка проблемы в множественно-предикативной форме

На основании полученных критериев выявления термов опасности (1.18), (1.20)–(1.24) и классов безопасности (1.25)–(1.32) детализируем постановку научной проблемы и представим её в следующем виде: по значениям  $\{V, F, R\}$  множественно-параметрического базиса системы *требуется*: 1) установить класс  $\xi$  безопасности и 2) меру определенности перехода системы в критическое  $Cr$  состояние  $\xi \rightarrow Cr$ :

$$\text{Det}(\xi \rightarrow Cr) = \text{Det}(\exists B \neq \emptyset) = \text{Det}(\exists B_{kk} \neq \emptyset) \mid T_{!!}(M_i) \neq \emptyset; M_i \neq \emptyset. \quad (1.33)$$

Для дальнейшей детализации оценки безопасности системы «ПОО — СМЗ — ОВФ — Ч» необходимо осуществить её абстрактно-алгебраическое и логическое описание. При этом необходимо учесть выявленные в ходе системного анализа в разделе 1 следующие условия и положения:

1. Система характеризуется как уникальная система: или подобных ей нет, или её аналоги весьма приближенны. Статистических данных об активных отказах или нет, или они не сопоставимы.
2. Активные отказы в системе представляют собой *редкие* события, среди которых отказ критического ПОЭ — очень редкое, но возможное событие.
3. Значения параметров множеств  $V, F, R$  есть *нечеткие* величины с прогнозируемыми областями их изменения.

Таблица 1.1

## Критерии идентификации классов безопасности системы

№ п/п	Класс состояния	Определение	Критерий идентификации
1	Абсолютно безопасная система	Объект не содержит ПОЭ	$V^i = \emptyset$
2	Потенциально безопасная система	ПОЭ объекта не восприимчивы к действию НФ	$T_l = \emptyset$
3	Относительно безопасная система	ПОЭ восприимчивы к НФ, но конструкция и защита исключают их действие	$T_l \neq \emptyset \wedge T_{ll} = \emptyset \wedge M_l = \emptyset$
4	Потенциально опасная система	Альтернатива классу 3: условия для отказа ПОЭ существуют, но отказ критического ПОЭ невозможен	$M_l \neq \emptyset \wedge B_{\kappa l} \neq \emptyset$
5	Повышенно опасная система	Подкласс класса 4, условия для отказа критического ПОЭ существуют	$B_{\kappa \kappa} \neq \emptyset$
5а	Собственно повышенно опасная система	Подкласс класса 5, существуют условия отказа критического ПОЭ от действия вторичных НФ	$B_{\kappa \kappa}^i \neq \emptyset$
6	Чрезвычайно опасная система	Подкласс класса 5, в котором риск $R_U$ нанесения ущерба $U$ превышает допустимое значение $R_U^d$	$B_{\kappa \kappa} \neq \emptyset \wedge R_U \geq R_U^d$
7	Состояние системы после происшествия	Альтернатива классам 4...6. Возникли и действуют вторичные факторы $V^c$ , ущерб $U$ от действия которых превысил допустимое значение $U_l$	$U \geq U_l$

## 1.6. Выводы по разделу 1

1. Положенный в основу вероятностной методологии оценки безопасности ситуационный (событийный) способ моделирования не позволяет в компактной и универсальной форме выразить причинно-следственные связи типа «воздействие — каналирование — ослабление — восприимчивость». Для устранения этого недостатка и в развитие указанного способа произведены обоснование и разработка факторного параметрического способа моделирования свойства «опасность — безопасность» технических систем вида «потенциаль-

но опасный объект — средства и мероприятия защиты — опасные и вредные факторы — человек». На основании доказательства теоремы о вложенности опорного и полного множеств видов и параметров факторов установлена эквивалентность предложенного способа ситуационному способу моделирования.

2. Построен факторный параметрический базис, представляющий собой совокупность множеств параметров внешних и вторичных воздействующих в системе факторов, множеств функций ослабления воздействий в защите и конструкции объекта, множеств параметров восприимчивости элементов объекта, а также сигнатур алгебр множеств и Буля. На основе введенного базиса рассмотрен булевый базис. На их основе применительно к любой системе может быть достигнуто компактное описание всего многообразия предпосылок опасности и их связей, а также их выражение в предикативной множественно-параметрической форме.
3. Сформулированы критерии выявления предпосылок и функций опасности и на их основе построен универсальный формализованный комплекс критериев, предназначенный для установления класса безопасности системы, а также для снижения затрат в процессе получения количественной меры риска.
4. В множественно-предикативной форме произведено уточнение научной проблемы, что позволило приблизиться к решению поставленной проблемы в целом.

Случайных аварий не бывает, есть неучтенные факторы и связи.

*Беляев В. И., Боков В. А.  
Уроки нештатных ситуаций*

## РАЗДЕЛ 2

---

### **Исследование логических функций опасности в упорядоченной системе**

#### **2.1. Анализ состояния вопроса и формулировка цели**

Выражение предпосылок опасности (1.28)–(1.31) в виде булевых переменных и отношений позволяет в ряде случаев упростить нахождение показателей безопасности и риска. Такое «огрубление» весьма полезно при количественной оценке сложных многофакторных систем. Однако, используя множественные и булевы показатели и критерии, важно устанавливать степень их соответствия. На основании теоремы Стоуна [29, 54] в расширенных алгебрах множеств можно выделить алгебры и их множества, изоморфные или, по крайней мере, гомоморфные другим, например булевым множествам (решёткам) [29]. Установление соотношения вводимых базисов и алгебр позволяет найти общую основу таким понятиям, как функции и аргументы алгебры логики высказываний и предикатов, структурные функции и функции связности элементов объекта по отказам, графы и структурно-логические схемы (деревья опасности) [5, 7, 9, 10, 17, 29, 48].

Отметим, что в рамках факторного параметрического описания техногенной системы и как детерминированной, так и вероятностной оценки безопасности систем являются важными задачи: а) об установлении отношений соответствия и порядка между аналоговыми и булевыми представителями (критериями, показателями и т. д.); б) формального выраже-



ния связности причинных термов опасности. Применительно к системам, размерность базиса которых превышает 100, описание связности предпосылок опасности в аналитической [9, 16, 32], логической [9, 62], графической [17, 33, 51] формах может оказаться настолько громоздким, что приводит к необходимости поиска асимптотического выражения функций связности [51, 62]. Поэтому очевидно, что формальное точное выражение многофакторной связности причин и (или) предпосылок опасности в техногенной системе представляет собой важную самостоятельную задачу.

Целями данного раздела являются:

- 1) описание базиса булевых множеств, гомоморфного факторному параметрическому базису (1.17);
- 2) булево описание связности предпосылок опасности в техногенной системе относительно выбранного происшествия (аварии) в системе и определение выражения функции связности в виде, удобном для представления её в сигнатуре алгебры нечетких множеств;
- 3) формулировка булевых дифференциальных и интегральных критериев опасности и доказательство теорем безопасности.

В рамках этого раздела считаем, что защита описана и учтена.

## 2.2. Описание безопасности системы в виде булевого базиса системы

### 2.2.1. Введение булевого базиса системы

Представим техногенную систему как совокупность конструктивно связанных элементов, описываемую множеством  $Z_1$  входов элементов, множеством  $Z_2$  каналов передачи (материализованной взаимосвязи элементов) и множеством  $Z_3$  выходов элементов. Входы последующего элемента-приёмника физически связаны (могут быть связаны) с выходами предыдущего элемента-источника через конструкцию объекта (через паразитные каналы). При этом штатные связи между элементами считаются здесь абсолютно безопасными, а потенциально опасные элементы по «штатным» факторам и сигналам идеально защищены и их влияние на потенциальную опасность системы не учитывается.

Введем множество  $E$  булевых аргументов, по аналогии с п. 1.2 описывающее восприимчивость по  $m$  виду параметра  $k$  потенциально опасного элемента объекта к действию  $t$  вида фактора,  $t \in T$ , дошедшего от  $l$  источника,  $l \in L$ , до  $k$  элемента-приёмника,  $k \in K$ :

$$E = (e_{m \ t \ l \ k}), e = 0 \vee 1, \quad (2.1)$$

причём при  $l = k$  принимается, что  $e = 0$ .

Элемент  $e_{m t l k}$  на основе формул (1.12) и (1.15) определяется как:

$$e_{m t l k} = o v_{m t l k} \wedge o r_{m t k} \wedge o f_{m t l k}, \quad l \neq k. \quad (2.2)$$

Как видно, множество  $E$  характеризует возможность осуществления нерегламентированной передачи (паразитные свойства конструкции) и восприятия видов факторов любым потенциально опасным элементом объекта.

Введем множество  $X$  логических аргументов, описывающих возможное инициирование элементов объекта:

$$X = (x_{m t l k}), \quad (2.3)$$

где  $x = 1$ , если  $s_{m t l k} \geq r_{m t k}$ ;  $x = 0$ , если иначе.

Множество  $X$  дифференцированно описывает способность любого элемента объекта инициировать при приложении к нему одиночных воздействий (воздействий от одного источника без накопления).

Введём множество булевых функций отказа (БФО) элементов объекта:

$$Y = (y_{m t l k}), \quad (2.4)$$

где  $y = 0 \vee 1$ ,  $m \in M$ ,  $t \in T$ ,  $l \in L$ ,  $k \in K$ ; при  $l = k$ ,  $y = 0$ .

В соответствии с определением активного отказа (1.2) можно записать:

$$y_{m t l k} = e_{m t l k} \wedge x_{m t l k}. \quad (2.5)$$

Последнее выражение представляет логическое умножение условий восприимчивости и способности  $k$  элемента инициировать при действии на него факторов без учёта их накопления.

Выделим из множества  $Y$  следующие подмножества:

- а) подмножество булевых функций опасности элементов объекта при условии действия только внешних факторов:

$$Y_{l=0} = (y_{m t k})_{l=0} = (y^e_{m t k}), \quad (2.6)$$

где  $y^e_{m t k}$  — элементарная булева функция отказа  $k$  элемента при действии  $t$  вида фактора внешнего источника;

- б) подмножество БФО элементов объекта при условии действия только вторичных факторов:

$$Y_{l \neq 0} = (y_{m t k})_{l \neq 0} = (y^i_{m t k}), \quad (2.7)$$

где  $y_{m t k}^i$  — элементарная булева функция отказа  $k$  элемента при действии  $t$  вида вторичных факторов, образуемых (способными образоваться<sup>xxii</sup>) элементами-источниками объекта.

Кроме того, относительно  $k$  элемента-приемника введем и обозначим подмножество БФО:

$$Y_k = (y_{m t k})_k. \quad (2.8)$$

Используем сигнатуру  $S_P$  алгебры решёток [29], которая объединяет такие операции, как логическое умножение  $\cap$ , логическое сложение  $\cup$ , инверсия  $\bar{\phantom{x}}$ , поглощение  $\subset$  и равенство  $=$ :

$$S_P = \langle \cap, \cup, \bar{\phantom{x}}, \subset, = \rangle.$$

Поскольку введённые множества  $X$ ,  $E$ ,  $Y$  принадлежат универсальному множеству  $\mathbf{1}$ , то по определению [29] на сигнатуре  $S_P$  такой базис множеств является булевым. Назовем его булевым базисом системы (ББС):

$$\text{ББС} = \{X, E, Y, S_P\}. \quad (2.9)$$

Отметим, что на нем справедливы отношения рефлексивности, симметричности и транзитивности [29, 54]. Эти свойства будут использованы для установления соответствия представителей базисов булевых, четких и нечетких множеств.

## 2.2.2. Выбор изоморфных представителей в базисах ББС и ФПБ

Если к элементам базисов ББС (2.9) и ФПБ (1.17) применять только операции из сигнатуры алгебры решёток, то из теоремы Стоуна следует, что между их элементами и подмножествами существует изоморфизм. К таким изоморфным парам относятся:

$$X - (R, S); E - (F, V); Y - (F, R, V). \quad (2.10)$$

Тогда в рамках этих пар можно найти эквивалентные представители, одинаково отображающие анализируемый отказ (происшествие) в системе. Другими словами, события отказа (состояния потенциальной опасности) в системе «ПОО — ОВФ — СМЗ» можно выражать либо в виде значений параметров системы в рамках базиса множеств (1.17), либо в виде логических значений в рамках булевого базиса системы. Однако, во втором подходе к анализу системы можно «огрубить» оценку безопасности системы до булевых отношений и булевых величин, что в ряде случаев

упрощает определение таких показателей, как связность, близость опасности, глубина безопасности.

### 2.3. Формулировка дифференциальных критериев выявления логических предпосылок опасности

Для анализа и дифференцированного выявления причин и предпосылок возникновения отказов в системе «ПОО — ОВФ — СМЗ» на основе введенного ББС сформулируем следующие *критерии*.

1. Элементарный критерий выявления предпосылок отказа произвольного  $k$  ПОЭ. Отказ наступит, если на множестве  $\mathbf{T}$  существует хотя бы один  $t$  вид фактора, образуемый хотя бы одним  $l$  источником из множества  $\mathbf{L}$ , при действии которого выполняется условие

$$Y_k = (y_{tl})_k = (e_{tl} \cdot x_{tl})_k = 1. \quad (2.11)$$

*Следствие 1.* Система безопасна, если выполняется предикат:

$$\forall k \in \mathbf{K} \rightarrow Y_k = \emptyset. \quad (2.12)$$

2. *Критерий* выявления предпосылки отказа  $k$  ПОЭ при действии множества  $T_1$  видов факторов:

$$Y_k^{T_1} = \bigvee_{t=1}^{T_1} (y_{tl})_k = \bigvee_{t=1}^{T_1} (e_{tl} \cdot x_{tl})_k = 1. \quad (2.13)$$

*Следствие 2.* Система безопасна на множестве нерегламентированных факторов, если выполняется предикат

$$\forall k \in \mathbf{K}, \forall t \in T_1 \rightarrow Y_k(T_1) = \emptyset. \quad (2.14)$$

3. *Критерий* выявления предпосылки отказа критического ПОЭ,  $k = k_K$ , при действии на него одиночного источника  $l = l_1$ , характеризуемого множеством  $T^{l_1}$  видов факторов:

$$Y_{k=c_r}^{l_1} = \bigvee_{t \in T^{l_1}} (e_{tl} \cdot x_{tl})_{k=c_r} = 1. \quad (2.15)$$

*Следствие 3.* Подсистема «критический ПОЭ — источник  $l = l_1$  нерегламентированных факторов» безопасна, если

$$\forall t \in T_1^l \rightarrow Y_{kk}(T_1^l) = \emptyset. \quad (2.16)$$

4. *Критерий* хотя бы однократного инициирования отказа критического ПОЭ от действия любого  $l$  одиночного источника из множества  $L_1$  с любым  $t$  видом фактора из множества  $T_1$  формулируется в виде:

$$Y_{c_r}^{T_1 L_1} = \bigvee_{l \in L_1} \bigvee_{t \in T_1} (e_{tl} \cdot x_{tl})_{k=c_2} = 1. \quad (2.17)$$

*Следствие 4.* Подсистема «критический ПОЭ — множество  $L_1$  источников нерегламентированных факторов, образующих множество  $T_1$ » безопасна, если выполняется предикат

$$\forall l \in L_1, \forall t \in T_1^l \rightarrow Y_{kk}(T_1, L_1) = \emptyset. \quad (2.18)$$

Таким образом, на основе булевого базиса системы введены и описаны критерии дифференцированного выявления отказов потенциально опасных элементов объекта. На основе этих критериев сформулированы условия безопасности системы «ПОО — ОВФ — СМЗ».

## 2.4. Вывод булевой формы функции связности системы

Структурно сложные системы часто характеризуются многофакторной и многоканальной связанностью своих компонентов. Исследование этих свойств позволяет учитывать дополнительные источники, возможные пути, обратные связи и нелинейные эффекты взаимодействия элементов объекта, которые в целом представляют собой причины и предпосылки возникновения происшествий.

Определим аналитическое выражение функции связности предпосылок опасности в системе как зависимость булевой функции инициирования критического (выходного) ПОЭ от множеств  $E, X$  с учетом всех возможных факторов и каналов связи элементов объекта между собой

$$^c Y_{c_2} = f_c(E, X).$$

Примем следующие ограничения:

- 1) существует упорядоченная передача воздействий от входа к выходу объекта;
- 2) критическим элементом является выходной (последний по нумерации)  $K = Cr = N_{вых}$  ПОЭ объекта;

- 3) имеется только направленное накопление вторичных воздействий на входы критического элемента.

Кроме того, не теряя общности, опустим обозначение параметров и примем допущение о равенстве элементарных функций отказов элементов при действии различных факторов из окружающей среды:

$$y_{to1} = y_{to2} = y_{tos} = \dots = y_{to}, \quad t \in T. \quad (2.19)$$

Это справедливо, поскольку рассматривается весь комплекс возможных внешних факторов и считается одинаковой мера определенности их появления.

При принятых допущениях и граничных условиях определим критическую функцию опасности как функцию направленного накопления воздействий от входа к выходу объекта, в составе которого имеются пронумерованные от входа к выходу ПОЭ, рис. 2.1.

Запишем булеву функцию предпосылки отказа ПОЭ1:

$$y_{t1} = y_{to1} e_{to1} x_{to1} = J_{to} \cdot (e \cdot x)_{to1}. \quad (2.20)$$

С учетом всех видов факторов из окружающей среды:

$$y_t = \bigvee_{i=1}^{T_1} y_{to} \cdot (e \cdot x)_{to1}. \quad (2.21)$$

Сделаем замену переменных:

$$z = e \cdot x, z = 0 \cup 1,$$

и пока опустим обозначение вида фактора. Тогда

$$y_1 = y_0 z_{01}. \quad (2.22)$$

Логическая функция предпосылок отказа ПОЭ2 с учетом подстановки (2.22) и связей, указанных на рис. 2.1, принимает вид:

$$y_2 = y_0 z_{02} \vee y_1 z_{12} = y_0 (z_{02} \vee z_{01} z_{12}).$$

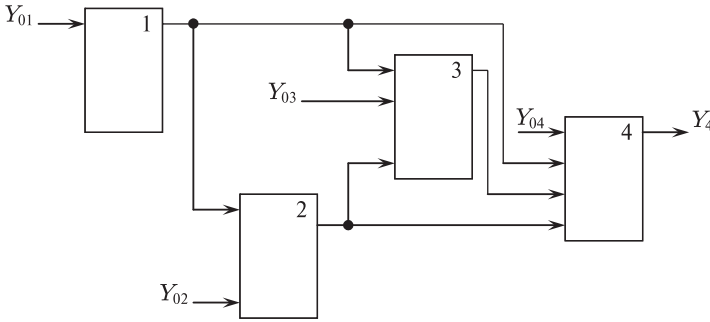
Сообразуясь с рис. 2.1, далее запишем функции выхода для элементов 3 и 4:

$$\begin{aligned} y_3 &= y_0 z_{03} \vee y_1 z_{13} \vee y_2 z_{23} = \\ &= y_0 (z_{03} \vee z_{01} z_{13} \vee z_{02} z_{23} \vee z_{01} z_{12} z_{23}); \\ y_4 &= y_0 (z_{04} \vee z_{01} z_{14} \vee z_{02} z_{24} \vee z_{03} z_{34} \vee \\ &\vee z_{01} z_{12} z_{24} \vee z_{01} z_{13} z_{34} \vee z_{02} z_{23} z_{34} \vee z_{01} z_{12} z_{23} z_{34}). \end{aligned} \quad (2.23)$$

С учетом существования всех видов факторов выходная функция отказа ПОЭ4 имеет вид:

$$y_4(T) = \bigvee_{t=1}^{T_1} y_{t0} (z_{t04} \vee z_{t01} z_{t14} \vee \dots \vee z_{t01} z_{t12} z_{t23} z_{t34}). \quad (3.24)$$

Рассмотрим множество элементов  $M_* = \{0, 1, 2, 3, 4\}$  и образуем от него упорядоченный булеан  $Bu(M_*)$  при условии, что все его элементы содержат номера 0 и 4 (т. е. содержат источник  $l=0$  и приёмник  $K = N_{вых} = 4$ ), см. рис. 2.1.



**Рис. 2.1** <sup>xxiii</sup>

Тогда элементы этого булеана образуются путём набора ориентированных сочетаний внутренних элементов множества  $M_*$ :

$$\begin{aligned} B_1 &= 04; B_2 = 014; B_3 = 023; B_4 = 034; \\ B_5 &= 0124; B_6 = 0134; B_7 = 0234; B_8 = 01234. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Число элементов булеана  $Bu(M_*)$  в общем случае равно

$$M_B = 2^{|M_*|-2}, \quad (2.26)$$

где  $|M_*|$  — мощность множества  $M_*$ , в данном случае равная 5.

Представляя произведения переменных  $z_{01} \cdot z_{14}$  как  $z_{0141}$  и вводя обозначения  $z_{014} = z_{01} \cdot z_{14}$ ;  $z_{0124} = z_{01} z_{12} z_{24}$  и т. д., а также, соответственно, обозначая их индексами элементов булеана  $B(4)$ , например,

$$z_{04} = z(B_1(N_{\text{вых}} = 4)); \quad z_{014} = z(B_2(4)); \quad z_{0124} = z(B_5(4)),$$

получаем компактную запись формулы (2.24):

$$y_4 = y_0 \prod_{m=1}^{2^{|M^*|-2}} z(B_m(4)). \quad (2.27)$$

При  $K = N_{\text{вых}}$  по индукции из формулы (3.27) следует:

$$y_{N_{\text{вых}}} = y_0 \prod_{m=1}^{2^{|N_{\text{вых}}+1|-2}} z(b_m(N_{\text{вых}})). \quad (2.28)$$

С учётом всех видов факторов,  $t = \overline{1, T_1}$ , получим формулу булевой функции критического происшествия как функцию  $Q_{kk}(\mathbf{Y}, \mathbf{E}, \mathbf{X})$  направленного накопления воздействий от входа к выходу объекта с учетом накопления на нём всех вторичных воздействий:

$$Q_{kk}(\mathbf{Y}, \mathbf{E}, \mathbf{X}) = y_{N_{\text{вых}}}(T_1) = \prod_{t=1}^{T_1} y_{t0} \prod_{m=1}^{2^{N_{\text{вых}}-1}} z_t(B_m(N_{\text{вых}})). \quad (2.29)$$

Поскольку никаких ограничений на природу отказов здесь не накладывалось, формула (2.29) может также использоваться для определения показателей надёжности и стойкости объектов, например для определения структурной функции надёжности [51] или логической функции стойкости объекта к воздействию внешних факторов [1, 38].

## 2.5. Характеристики и теоремы безопасности с учетом связности предпосылок опасности

### 2.5.1. Введение и определение характеристик безопасности

На основе полученных в п. 2.3 и 2.4 результатов введем и определим некоторые характеристики безопасности системы.

Сначала дадим следующие определения.

*Определение 1.* Система называется потенциально безопасной с видовым рангом  $q$ , численно равным количеству видов факторов невосприимчивости из полного количества  $T^i$ , где  $T^i$  — количество всех возможных видов вторичных факторов объекта.

Из определения 1 следует, что система максимально безопасна, если



$$q = T^i, \quad (2.30)$$

и минимально собственно безопасна, если  $q = 0$ .

*Определение 2.* Глубиной  $h$  потенциальной безопасности системы относительно исхода — активного отказа ПОЭ — называется минимальное количество нулей (нулевых узлов) в кратчайшем пути  $(l^1, k)_{\min}$ , где  $l^1$  — ближайший источник воздействия. Причём  $h^e$  характеризует глубину безопасности при действии внешних факторов,  $h^i$  — при действии внутренних вторичных факторов.

Из определения 2 следует, что глубина определяется по формуле связности.

Например, для объекта, <sup>xxiv</sup>рис. 2.1 по формуле связности (2.23) получим:

$$\begin{aligned} y_4 &= z_{02}z_{23}z_{34} \vee z_{01}z_{12}z_{23}z_{34} = \\ &= 0 \cdot z_{23} \cdot 0 \vee z_{01} \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0, \end{aligned}$$

откуда глубина  $h = 2$ .

*Определение 3.* Кратчайшим путём  $P$  активного отказа  $k$  ПОЭ, связанного с  $l$  источником, называется дизъюнкция в функции связности, содержащая минимальное количество логических переменных.

Кратчайший путь обозначается:

$$P(l\tilde{k} - \min). \quad (2.31)$$

Например, если в формуле (3.24) записаны все слагаемые, то кратчайший путь — <sup>xxv</sup>рис. 2.1  $P(04)$ . Если же в формуле (3.24) присутствуют только два последних слагаемых, то кратчайший путь —  $P(0234)$ .

*Определение 4.* Элементарным защитным узлом ПОО называется его схемотехнический, конструктивный или иной элемент, наличие которого в пути  $l^1k$ , описываемом элементарной функцией связности, например:

$$\begin{aligned} y_{l^1k} &= y_{l^1}(e(c) \cdot x(d))_{l^1+1} \cdot \dots \\ &\dots \cdot (e(c)x(d))_{l=N-1, K=N}, \end{aligned}$$

приводит к образованию условий вида:

$$e(c) = 0 \text{ или } x(d) = 0. \quad (2.32)$$

Введённые определения и характеристики с позиций возможной связности и накопления причинных предпосылок опасности в объекте расширяют и уточняют определения и критерии, описанные в п. 1.3 и п. 2.3.

### 2.5.2. Доказательство булевых теорем о безопасности системы

*Теорема 1.* Техногенная система «с необходимостью безопасна», если у технического объекта множество восприимчивости объекта пусто,  $E = \emptyset$ .

*Доказательство.* Условие  $E = \emptyset$  означает, что ни один ПОЭ объекта не восприимчив к действию любого внешнего или внутреннего фактора. Следовательно, инициирование любого ПОЭ невозможно,  $X = \emptyset$ . Поэтому ни один потенциально опасный элемент не откажет.

Для того чтобы хотя бы один элемент отказал, необходимо, чтобы действующие на него факторы были восприняты. А такое необходимое условие не выполняется, поэтому указанная система «с необходимостью безопасна». Что и требовалось доказать.

*Теорема 2.* Если априорно множество  $E$  пусто,  $E = \emptyset$ , но при действии на ПОО внешних факторов происходит нарушение защиты или повреждение хотя бы одного его ПОЭ, то такая система «собственно потенциально опасна».

*Доказательство.* По условию действие внешних факторов на объект приводит к нарушению его защитных свойств (утрате невосприимчивости) или к повреждению его элементов конструкции, что может допустить проникновение нерегламентированных видов факторов на ПОЭ. При этом появляется возможность образования ненулевых элементов множества  $E$ :

$$e_{ilk} \neq 0, \quad t \in T, \quad l \in L, \quad k \in K. \quad (2.33)$$

Поскольку  $E \neq \emptyset$ , то в общем случае ПОЭ могут воспринимать вторичные факторы системы, т. е. существует возможность выполнения условия  $X^i \neq \emptyset$ . Тогда:

$$Y^i = (E X)^i \neq \emptyset. \quad (2.34)$$

Это означает, что система «собственно потенциально опасна». Что и требовалось доказать.

*Следствие* из теоремы 2. ТО собственно потенциально опасен, если его множество  $E$  не пусто,  $E \neq \emptyset$ .

*Теорема 3.* Если у технического объекта априорно множество  $E$  не пусто,  $E \neq \emptyset$ , а множество  $X$  пусто,  $X = \emptyset$ , но при действии на этот объект

внешних факторов возникает возможность активного отказа хотя бы одного ПОЭ, то такая техническая система потенциально опасна.

*Доказательство.* Из условия о возможности АО хотя бы одного ПОЭ при действии внешних факторов следует, что возможно и образование при этом ненулевых элементов подмножества  $X^e$ , т. е.  $X^e \neq \emptyset$ .

С учетом того что  $E \neq \emptyset$ , получим непустое подмножество значений функций выхода от действия на объект внешних факторов

$$Y^i = (EX)^i \neq \emptyset. \quad (2.35)$$

Таким образом, такая система *потенциально опасна*.

*Следствие* из теоремы 3. Если действие факторов из окружающей среды на ТО не приводит к отказу ни одного ПОЭ (отказ любого ПОЭ невозможен), то такая система «относительно безопасна».

### 3.6. Формулировка проблемы на основе булевого базиса и множества функций опасности

На основе описания системы в виде множественно-параметрического и булевого базисов множество  $Q$  функций опасности представим как зависимости вида:

$$Y = Q(X, Y, E, V, F, R); Y_{kk} = Q_{kk}(X, Y, E, V, F, R); \quad (2.36)$$

где  $Q$  и  $Q_{kk}$  — соответственно обозначение множеств функций опасности во всей системе и относительно критического ПОЭ.

В частности, для оценки безопасности важными оказываются исследования функторов, выраженных в виде предикатов:

$$\exists Y \neq \emptyset / Q(Y, E, X), \forall V, F, R; \exists Y_{kk} \neq \emptyset / Q_{kk}(Y, E, X), \forall V, F, R. \quad (2.37)$$

Тогда с учетом критического функтора связности постановка проблемы, зависимость (1.33), имеет вид:

$$\text{Det}(\xi \rightarrow Cr) = \text{Det}(\exists B_{kk} \neq \emptyset \wedge Q_{kk}(Y, E, X) \neq \emptyset) \mid T_{II}; (M_I) \neq \emptyset; M_I \neq \emptyset. \quad (2.38)$$

## 2.7. Выводы по разделу 2

1. Для многофакторной структурно сложной техногенной системы построен булевый базис множеств, в рамках которого описаны представители в виде функций, критериев и показателей, изоморфные представителям факторного параметрического базиса. Такое описание

системы в виде двух базисов позволяет разделить задачи выявления предпосылок и функций опасности и впервые формализовать общее их решение применительно к любой системе рассматриваемого вида.

2. В отличие от решения Литвака—Ушакова [51] с помощью введенного упорядоченного булеана получено точное и полное выражение критической функции опасности (зависимость (2.29)), позволяющее: а) определять интегральные характеристики безопасности (риска) системы; б) относительно критического исхода строить дифференциальные и интегральные критерии для идентификации опасности в системе.
3. Сформулированы теоремы о безопасности системы и на их основе получены отличительные критерии, расширяющие и углубляющие представления о классах безопасности и возможных переходах между ними в потенциально опасных системах, а также способствующие обоснованию и оценке эффективности средств и мероприятий защиты.
4. На основе полученных аналитических выражений функций связности предпосылок происхождения произведена детализация множественно-предикативной формулировки научной проблемы, что способствовало нахождению общего решения проблемы в целом.

Главное<sup>xxvi</sup> из преимуществ, по-  
видимому, являе<sup>т</sup>ся способность мозга  
оперировать нечетко очерченными по-  
нятиями.

*Норберт Винер. Творец и робот*

## РАЗДЕЛ 3

---

### Определение возможностной (нечеткой) меры реализации происшествий в системе

#### 3.1. Формулировка целей раздела

В данном разделе на основании теории нечетких множеств Л. Заде, а также ее перспективной ветви — теории возможностей (possibility theory) (П. Прад, Д. Дюбуа, А. Демпстер), вводится и описывается базис нечетких множеств непрерывных и дискретных величин, условно названный здесь базисом Заде.

Для единого обоснования и определения четких и нечетких показателей безопасности системы в общем случае необходимо рассмотреть условия и доказать соответствие базиса Заде этой системы факторному параметрическому базису и булевому базису системы. Причем поставленная цель достигается дедуктивным путем: рассматриваются условия и доказываются теоремы о *гомоморфизме* алгебры Заде алгебрам множеств и Буля. При этом учитывается, что базис четких множеств (1.17) задан на алгебре Кантора, булевый базис системы (2.9) — в рамках алгебры Буля. На основании такого общего подхода ставится и решается задача [39–42] о нахождении представителей в виде возможностных мер, эквивалентных (находящихся в одних классах эквивалентности) относительно выбранных событий (исходов) представителям четких алгебр, описанных в виде параметрических показателей или логических условий опасности.

Попутно отметим, что установление безразмерных значений возможностных мер отказов в разнородных техногенных и экологических систе-

мах позволяет сравнивать опасность систем, ранжировать опасность системы по близости, а безопасность — по глубине.

### 3.2. Соотношение мер определенности возникновения происшествия в системе

Рассмотрим фундаментальное соотношение мер определенности [11, 12] для события  $C$  в некоторой системе

$$\text{Nec}(C) \leq \text{Pro}(C) \leq \text{Pos}(C), \quad (3.1)$$

где  $\text{Nec}(C)$  — мера необходимости детерминированного представления события  $C$ ;

$\text{Pro}(C)$  — вероятностная мера случайного представления события  $C$ ;

$\text{Pos}(C)$  — возможностная мера нечеткого представления события  $C$ .

Если в качестве события  $C$  в системе рассмотреть самый нежелательный исход (происшествие), то оказываются достижимыми сравнение и представление результатов, в частности, в виде вероятностной и возможностной оценок безопасности и, тем самым, нахождение асимптотических значений вероятности происшествия.

При анализе, оценке и проектировании систем различного назначения используются параметрические модели отказа вида «параметр — поле допуска», «воздействие — чувствительность», которые здесь формально представляем как [14]

$$d = \text{Det}(s > r) = \text{Det}(t), \quad (3.2)$$

где  $r$  и  $s$  — параметры восприимчивости и воздействия, соответственно характеризующие объект и воздействующий на объект фактор,  $d$  — мера определенности реализации критерия отказа  $t: s > r$ ,  $\text{Det}(\cdot)$  — оператор, применяемый для нахождения меры  $d$ .

В зависимости от точности, полноты и достоверности информации о возможных реализациях величин  $s$  и  $r$  в рассматриваемой системе «факторы — объект» величина  $d$  может быть представлена [10–12] как мера необходимости  $n = \text{Nec}(t)$  или мера вероятности  $p = \text{Pro}(t)$  или мера возможности  $\pi = \text{Pos}(t)$ .

При нормировке на интервале вещественных чисел  $[0, 1]$  для одного отдельно взятого критерия  $t$  эти меры находятся в следующем отношении [11, 12]:

$$\text{Nec}(s > r) < \text{Pro}(s > r) < \text{Pos}(s > r), \quad (3.3)$$

где под  $s$ ,  $r$  соответственно понимаются: в операторе Nec — детерминированные, в операторе Pro — случайные, в операторе Pos — нечеткие величины.

Если система «факторы — объект» детерминирована, то мера принимает одно из двух значений: 0 или 1. Если система «факторы — объект» случайна и известны плотности распределения  $f_1(s)$  и  $f_2(r)$  случайных величин  $s$  и  $r$ , то вероятность реализации критерия  $t$  находится по зависимости [14, 46]:

$$d = p = \text{Pro } (s > r) = \int \int_{s > r} f_1(s) f_2(r) ds dr. \quad (3.4)$$

Если плотности распределения  $f_1(s)$ ,  $f_2(r)$  неизвестны, что характерно для уникальной системы, то асимптотическое значение меры отказа в ней может быть найдено путем описания  $s$  и  $r$  как нечетких величин и применения к ним операций сигнатуры нечетких множеств [11, 39, 42].

Если функции принадлежности параметров  $s$ ,  $r$  известны, то мера  $\pi$  может быть найдена путем решения задачи о сравнении двух нечетких интервалов [11].

В большинстве практических случаев эксперты могут получить с некоторой степенью уверенности исходные данные о модели отказа в виде границ ядер и носителей нечетких величин, но не о виде их функций принадлежности, что затрудняет применение общего подхода. В таких условиях важным оказывается обоснование видов функций принадлежности по отношению ко всему диапазону изменения исходных данных [47, 50].

В свою очередь, при отыскании значений меры отказа от 0,03 и ниже большое значение приобретает как анализ крайних условий задачи, так и анализ их влияния на результат её решения. Применительно к сложным системам, у которых произведение количества элементов на количество связей между ними превышает число 100, такое «огрубление» требований к представлению нечетких величин, например, только по уровню  $\alpha$ -среза, и к оперированию с ними в рамках сигнатуры нечетких множеств, дает практические преимущества. Причем главными из преимуществ является получение конечного результата при даже малом наборе исходных данных, имеющем место из-за стоимостных и (или) временных ограничений на получение и преобразование информации [39].

### 3.3. Построение нечеткого множественно-параметрического базиса системы

#### 3.3.1. Элементы и операции базиса

Известно, что теория нечетких множеств (theory of the fuzzy sets) родилась на стыке теории множеств и теории вероятностей [11, 64]. При этом меры неопределенности состояний (событий) можно описывать не только с позиций вероятностного подхода, но и с использованием методов теоретико-множественного анализа [43, 49, 50].

Введем в ФПБ (1.17) и в ББС (2.9) алгебру Заде, а затем на их основе формально определим «базис Заде» и возможность меру реализации предположек и функций опасности техногенной системы.

В качестве элементов базиса выделим и обозначим классы непрерывных  $\Lambda$  и дискретных  $\Omega$  нечетких множеств, определяемых соответственно на множествах-носителях  $R^1$  и  $1$  следующими множествами функций принадлежности:

$$M_{\Lambda}(\lambda) = ({}_{mtk} \mu_{\Lambda}(\lambda)), \quad (3.5)$$

$$M_{\Omega}(\omega) = ({}_{mtk} \mu_{\Omega}(\omega)), \quad (3.6)$$

где при  $t \in T, m \in M, k \in N$   $\mu_{\Lambda}(\lambda), \mu_{\Omega}(\omega)$  — функции принадлежности переменной  $\lambda(\omega)$ , соответствующие нечеткому множеству  $\Lambda(\Omega)$ , заданному на носителе  $R^1(1)$ .

При этом под непрерывной переменной  $\lambda$  будем понимать параметры восприимчивости  $r$ , воздействия  $s$  и их пересечения  $b$ . Под дискретной переменной  $\omega$  будем понимать любые элементы алгебры Буля (решетки)  $A_p$ , бинарные логические переменные, например,  $x, y, or, os$  и т. д.

Таким образом, в качестве элементов базиса нечетких множеств рассматриваются **функции принадлежности** непрерывных и дискретных нечетных величин.

Известно, что сигнатура нечетких множеств имеет вид [11]:

$$S_3 = (\subseteq, =, \min, \max, \bar{\phantom{x}}), \quad (3.7)$$

где  $\subseteq$  — операция включения:  $\Lambda \subseteq \Theta \forall \lambda, \mu_{\Lambda}(\lambda) \leq \mu_{\Theta}(\lambda)$ ;

$=$  — операция равенства:  $\Lambda = \Theta \forall \lambda, \mu_{\Lambda}(\lambda) = \mu_{\Theta}(\lambda)$ ;

$\min$  — операция пересечения нечётких множеств:



$$\forall \lambda, \mu_{\Lambda \cap \Theta}(\lambda) = \min(\mu_{\Lambda}(\lambda), \mu_{\Theta}(\lambda));$$

$\max$  — операция объединения нечётких множеств:

$$\forall \lambda, \mu_{\Lambda \cup \Theta}(\lambda) = \max(\mu_{\Lambda}(\lambda), \mu_{\Theta}(\lambda));$$

— операция дополнения:  $\forall \lambda, \mu_{\Lambda}(\lambda) = 1 - \mu_{\Lambda}^-(\lambda)$ .

Тогда, с учетом формул (3.5)–(3.7), базис Заде определяется как:

$$A_3 = \langle M_{\Lambda}(\lambda), M_{\Omega}(\omega), S_3 \rangle. \quad (3.8)$$

В базисе  $A_3$  можно выделить базисы относительно непрерывных и дискретных нечетких множеств:

$$A_{3n} = \langle M_{\Lambda}(\lambda), S_3 \rangle, \quad (3.9)$$

$$A_{3o} = \langle M_{\Omega}(\omega), S_3 \rangle. \quad (3.10)$$

Анализ сигнатуры показывает, что базис  $A_3$  обладает свойствами идемпотентности, коммутативности, ассоциативности и дистрибутивности.

Ниже будет доказано, что базисы  $A_{3n}, A_{3o}$  изоморфны, если изоморфны образующие их четкие непрерывные (параметрические) и дискретные (решетчатые) базисы системы.

### 3.3.2. Возможностная мера отказа. Формальный аспект

Знание меры возможности  $P(\xi)$  сводится к стремлению локализовать значение непрерывной переменной  $\lambda$  (дискретной переменной  $\omega$ ) и выразить через них на универсальном множестве  $\Lambda(\Omega)$  каждое событие (реализацию предпосылки)  $\xi$ . При этом в широком смысле мера  $P(\xi)$  есть мера определенности информации об отношении:

$$\lambda \in \xi, \omega \in \xi. \quad (3.11)$$

Формально (в узком смысле) по Заде и Праду [11, 64] вероятностная мера — это степень принадлежности, например, значений переменной  $\lambda$  нечеткому множеству  $\Lambda$ , определяемая по функции принадлежности  $\mu_{\Lambda}(\lambda)$ . Аналогично выражается вероятностная мера значений дискретной величины — по функции принадлежности  $\mu_{\Omega}(\omega)$ . В обеих формулах подразумевается, что:

- $\Lambda$  — нечеткое множество на носителе  $R^1, \lambda \in R^1$ ;

- $\Omega$  — нечеткое множество на универсальном носителе  $1, \omega = 0 \vee 1$ .

Обозначив множество нечетких подмножеств универсального множества  $\Omega$  как  $[0, 1]^\Omega$ , множество нечетких подмножеств универсального множества  $\Lambda$  как  $[0, \lambda^B]^\Lambda$ , где под  $B$  подразумевается верхнее значение величины, определим возможность меру появления дискретной величины и непрерывной величины соответственно как:

$$\forall P, \exists \Omega \in [0, 1]^\Omega, \forall \omega \in \Omega, P(\omega) = \mu_\Omega(\omega), \quad (3.12)$$

$$\forall P, \exists \Lambda \in [0, b^B]^\Lambda, \forall \lambda \in \Lambda, P(\lambda) = \mu_\Lambda(\lambda). \quad (3.13)$$

Из формул (3.12), (3.13) следует, что для нахождения возможностной меры события  $\xi$  достаточно найти значение функции принадлежности в одной точке (при определенном значении нечеткой величины, заданной, например, с позиций анализа критериев опасности). В этом отличие нахождения возможностной меры от меры вероятности.

Когда множество  $\Omega(\Lambda)$  конечно, то множество мер возможности  $P$  можно определить по ее значениям на одноточечных подмножествах  $\Omega(\Lambda)$ . Например, для  $\Omega$ :

$$P(\xi) = \sup \{ \pi(\omega) | \omega \in \xi \}, \quad (3.14)$$

где  $\pi(\omega) = P(\{\omega\})$  — функция распределения возможностей [11, с 19].

В качестве иллюстрации найдем возможностные меры дискретных  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  и непрерывной  $\Lambda_1$  нечетких величин, заданных на носителе — множестве  $\{0, 1\}$  и носителе — множестве  $[0, b_B]$ , рис. 3.1.

$$\begin{aligned} \text{Причем } \Omega_1 \div \mu_{\Omega_1}(\omega) &= 1; \quad \Omega_2 \div \mu_{\Omega_2}(\omega) = 0,5 \forall \omega; \quad \Omega_3 \div \mu_{\Omega_3}(\omega) = \\ &= \{0,2 \text{ при } \omega = 0; 0,4 \text{ при } \omega = 1\}; \quad \Lambda_1 \div \mu_{\Lambda_1}(\lambda) = \\ &= \{1 \text{ при } 0 \leq \lambda \leq 1, 2 - \lambda \text{ при } 1 < \lambda \leq b_B = 2\}. \end{aligned}$$

Тогда на основе зависимости (3.12) возможностная мера появления нечетких величин  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  равна соответственно  $P_1(\omega = 1) = 1, P_2(\omega = 1) = 0,5, P_3(\omega = 1) = 0,4$ . Если нечеткие величины  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  есть подмножества множества  $\Omega$  на том же носителе, то возможностная мера события  $\xi$  на нечетком множестве  $\Omega$  определяется по

формуле (3.13) и равна  $\Pi_{\Omega}(\xi) = 1$ . Вероятностная мера появления нечеткой величины  $\Lambda_1$  в точке  $\lambda = 1,5$  равна  $\Pi_{\Lambda_1}(\lambda = 1,5) = 0,5$ .

Таким образом, формально вероятностная мера характеризует асимптоту принадлежности нечеткой величины носителю.

### 3.3.3. Физический аспект вероятностной меры отказа

В физическом аспекте определение вероятностной меры того или иного события (отказа) связано с изучением системы объектов (элементов), причин и следствий (факторов), в комплексе влияющих на данный исход. Более детальный анализ приводит к разбиению объекта на элементы и к учету действия всех возможных видов факторов на возможных областях изменения их параметров. В этом смысле вероятностная мера события — это интегральный показатель системы относительно одной цели (исхода).

Множественно-параметрическое описание техногенной системы, произведенное в разделе 1, позволяет обосновывать определение такой меры путем перебора, пересечения и объединения частных (дифференциальных) вероятностных мер отказа элементов объекта при отдельных внешних и вторичных воздействиях, распространяющихся в любых возможных паразитных каналах.

Булево представление условий отказов в системе с учетом связности элементов (раздел 2) более рельефно позволяет выразить интегральную вероятностную меру возникновения исследуемого исхода на комплексе элементарных мер с накоплением причин и предпосылок опасности.

Таким образом, при рассмотрении событий (реализаций предпосылок и функций опасности) в физическом аспекте и выражении их в *нечетком множественно-параметрическом* виде становятся очевидными методы и модели для определения вероятностной меры их возникновения, в формальном плане — ясными правила оперирования с ней.

### 3.3.4. Описание расширенной алгебры нечетких множеств

Пусть  $\Gamma$  — множество исходов воздействий физических факторов из окружающей среды на технический объект:

$$\Gamma = (\xi_i), \quad i \in I, \quad (3.15)$$

где  $I$  — множество номеров исходов.

Определим множество вероятностных мер исходов как:

$$\overline{\Pi_{\Lambda}}(\Gamma) = (\Pi_{\Lambda}(\xi_i), i \in I), \quad (3.16)$$

$$\overline{\Pi_{\Omega}}(\Gamma) = (\Pi_{\Omega}(\xi_i), i \in I). \quad (3.17)$$

Вводя множества (3.15), (3.16) в алгебру нечетких множеств и оставляя справедливыми для них операции сигнатуры  $S_3$ , получим расширенную алгебру нечетких множеств вида:

$$A_{HM} = \langle A_3, \overline{\Pi_{\Lambda}}(\Gamma), \overline{\Pi_{\Omega}}(\Gamma) \rangle. \quad (3.18)$$

Рассмотрение такой алгебры оказывается полезным, если ставится задача оптимизации системы по комплексу показателей с учетом опасности совокупности исходов.

### 3.4. Доказательства теорем о соответствии базисов $A_M, A_P, A_3$ .

На основании рассмотрения свойств базисов множеств  $A_M$ , решеток  $A_P$  и нечетких множеств  $A_3$  докажем следующие теоремы.

*Теорема 1.* Базису множеств  $A_M$ , определенному как объединение факторного параметрического базиса (1.17) с сигнатурой, введенной в п. 1.2.3, по крайней мере гомоморфен базис Заде  $A_{3H}$  для непрерывных нечетких множеств:  $A_M \rightarrow A_{3H}$ .

*Доказательство.* По определению, базис  $A'$  гомоморфен базису  $A$ , если его элементам  $a, b, c$  множеств и операциям однозначно соответствуют элементы  $a', b', c'$  множеств и операции базиса  $A'$  и при этом:

$$a * b = c \rightarrow a' *' b' = c'. \quad (3.19)$$

Выберем в базисе  $A_M$  два любых элемента-множества, например  $S$  и  $R$ , и возьмем операцию объединения их:  $S \cup R$ .

В рамках базиса  $A_{3H}$  этим элементам и операциям объединения над ними однозначно соответствует выражение  $\max(\mu_S(\lambda), \mu_R(\lambda))$ , т. е. имеем:

$$S \cup R \rightarrow \max(\mu_S(\lambda), \mu_R(\lambda)), S, R, \Lambda \in R^1. \quad (3.20)$$

Если рассмотреть все операции сигнатур  $S_M$  и  $S_Z$  над любыми соответствующими элементами множеств базиса  $A_M$  и множеств  $M_\Lambda(\lambda)$ , то между ними прослеживаются отношения соответствия типа (3.19). А это доказывает, что базис  $A_{3H}$  гомоморфен базису  $A_M : A_M \rightarrow A_{3H}$ .

Отметим, что обратное неверно, поскольку в базисе  $A_M$  заданы множества и операции, которым нет аналогов в базисе  $A_{3H}$ .

Из теоремы 1 вытекает следующая лемма.

**Лемма 1.** В множествах базисов  $A_M$  и  $A_{3H}$  имеются классы представителей, в рамках которых попарно группируются параметрические показатели и частично эквивалентные им возможностные меры реализации термов и функторов опасности.

**Доказательство.** Если базисы  $A_M, A_{BH}$  гомоморфны с направлением  $A_M \rightarrow A_{3H}$ , то между их элементами (множествами и их элементами) существуют отношения рефлексивности, асимметричности и транзитивности. Такое сочетание отношений характеризуется [29] как отношение **направлений** <sup>xxvii</sup> (стичной) эквивалентности. Следовательно, при существовании **отношений** <sup>xxviii</sup> выбранных исходов классов эквивалентных представителей базисов  $A_M, A_{3H}$  параметрическим показателям отказа из базиса  $A_M$  всегда найдется эквивалентная возможностная мера этого исхода из базиса  $A_{3H}$ . Что и требовалось доказать. Обратное может быть неверно.

**Теорема 2.** Если множествам базиса (3.10) как элементам алгебры решеток  $A_p : X, Y, E$  определены множества функций принадлежности:

$$M_X(\omega) = ({}_{mke} \mu_x(\omega)), M_Y(\omega) = ({}_{mlk} \mu_y(\omega)), \\ M_E(\omega) = ({}_{mlk} \mu_e(\omega)), \text{ где } x, y, e, \omega = 0 \vee 1, E, X, Y \subseteq 1,$$

то базис Заде для введенных дискретных нечетких множеств  $A_{3д'}$  гомоморфен булевому базису  $A_p : A_p \rightarrow A_{3д'}$ .

**Доказательство** теоремы проведем по аналогии с теоремой 1. Учтем существование соответствия (кроме выполнения закона комплементарности) между сигнатурами базисов Буля и Заде. Тогда при выполнении условия теоремы об определении соответствующих пар множеств:

$$X, M_X(\omega); Y, M_Y(\omega), E, M_E(\omega), —$$

можно установить следующие прямые соответствия по операциям, например,

$$X \cap Y \rightarrow \min(M_X(\omega), M_Y(\omega)),$$

распространив их затем на все операции сигнатур  $S_3$  и  $S_B$ .

Таким образом, доказано, что существует гомоморфизм вида  $A_p \rightarrow A_{3Д}$ .

Отметим, что обратное неверно, поскольку, например, в операции  $(\min)$  значения пересечений функций принадлежности могут неоднозначно выражать конъюнкции элементов:

$$x_{mtk} \cap y_{mtk}, \forall m \in M, t \in T, k \in N.$$

На основании теоремы 2 сформулируем лемму 2.

*Лемма 2.* Элементы множеств базисов  $A_p$  и  $A_{БД}$  относительно выбранного исхода могут находиться в отношении направленной эквивалентности вида:

$$y = 1 \rightarrow \mu_y(\omega) = \varepsilon, \text{ где } \varepsilon \text{ — некоторое число, } \varepsilon \in [0,1].$$

*Теорема 3.* Базисы  $A_{3Н}$ ,  $A_{3Д}$  изоморфны,  $A_{3Н} \leftrightarrow A_{3Д}$ , если изоморфны образующие их четкие непрерывные  $A_M$  и дискретные  $A_p$  базисы, т. е. если  $A_p \leftrightarrow A_M$ , то  $A_{3Н} \leftrightarrow A_{3Д}$ .

*Доказательство.* Из теорем 1 и 3 следует, что  $A_p \rightarrow A_{3Д}$  и  $A_M \rightarrow A_{3Н}$ . Так как  $A_p \leftrightarrow A_M$ , то тогда и  $A_{3Д} \leftrightarrow A_{3Н}$ .

Что и требовалось доказать.

### **3.5. Аналитический метод определения возможностной меры реализации предпосылок опасности**

#### **3.5.1. Постановка и общий алгоритм решения задачи**

Рассмотрим задачу об установлении возможностной меры реализации происшествий по критерию опасности сначала в общем виде.

Пусть показатель  $G$  опасности системы есть заданная на сигнатуре  $S_M$  базиса множеств функция от подмножеств, выражающих частные показатели  $G_B, G_I$ :

$$G = \Phi^{S_M} (G_B(S, R \in R^1), G_I(I = (0, 1))), \quad (3.21)$$

где  $G_B(\dots), G_I(\dots)$  — в множественно-параметрической форме выражения критериев выявления опасности, формулы (1.29), п. 1.4;

$\Phi^{S_M}$  — заданная (найденная) функция связности предпосылок в системе как функция от частных показателей элементов, причём сигнатура  $S_M$  — общая для непрерывных и дискретных величин.

Пусть на основе показателя (3.21) критерий выявления опасности имеет вид:

$$G^{(l)} = \Phi^{S_M} (G_{B \setminus 0}, G_{I=1}) \neq 0. \quad (3.22)$$

Иначе говоря, возможность реализации опасности существует, если показатель  $G$  принимает ненулевые (любые положительные) значения  $G \setminus 0$  <sup>xxviii</sup> обозначаемые как  $G^{(l)}$ . При этом налагаемые на частные показатели условия вида  $G_{B \setminus 0}$  и  $G_{I=1}$  можно считать краевыми условиями задачи.

Далее, известны множества нормированных функций принадлежности  $M_B(\lambda), M_Y(\omega)$  подмножеств-пересечений  $G_B$  и  $G_Y$ , причем:

$$M_B(\lambda) = (\mu_{\Lambda_i}(\lambda)), \text{ где } i \in BM, \forall \Lambda_i : \lambda \in R^1, \quad (3.23)$$

$$M_I(\omega) = (\mu_{\Omega_i}(\omega)), \text{ где } i \in BT, \forall \Omega_i : \omega = 0 \vee 1, \quad (3.24)$$

где  $BM, BT$  — соответственно подмножества видов параметров и видов факторов, описывающих независимые непрерывные  $\Lambda_i$  и дискретные  $\Omega_i$  нечёткие величины. Требуется определить возможностную меру реализации опасности в системе.

*Решение:*

1. Обозначим возможностную меру как  $\Pi_{G \setminus 0}^{(l)}(\omega, \lambda)$ .
2. Определим граничные условия. Из условия задачи известно, что непрерывные нечёткие величины  $\Lambda_i$  заданы на носителе — области вещественных чисел, описываемой переменной  $\lambda$ . Дискретные нечёткие величины  $\Omega_i$  заданы на носителе  $\omega = 0 \vee 1$ .

Частный критерий опасности  $G_{B \setminus 0}$  выполняется тогда и только тогда, когда  $\lambda \setminus 0$ , см. (1.26), п. 1.4. Поэтому, применительно к непрерывным нечётким величинам можно записать:

$$G_{B \rangle 0} \leftrightarrow \forall \Lambda_i \exists \lambda \rangle 0, \quad (3.25)$$

что совпадает с формой записи предикатов.

Другой частный критерий выполняется тогда и только тогда, когда:

$$G_{I=1} \leftrightarrow \forall \Omega_i \exists \omega = 1. \quad (3.26)$$

Таким образом, определяющие значение возможностной меры граничные условия имеют вид:

$$\Pi_{G_{\neq 0}^{(j)}}(\omega = 1, \lambda \rangle 0). \quad (3.27)$$

3. На основании теорем о гомоморфизме базиса Заде булевому и множествонно-параметрическому базисам в формуле (3.21) произведем замену элементов и операций, т. е. выполним гомоморфные преобразования. При этом с учётом формул (3.23), (3.24) получим выражение показателя безопасности в виде функции принадлежности:

$$M_G = \Phi^{SHM}(M_B(\lambda), M_Y(\omega)). \quad (3.28)$$

4. Используя правило нахождения возможностной меры по функции принадлежности и подставляя граничные условия в (3.27), возможностную меру определим как:

$$\Pi_{G_{\neq 0}^{(j)}}(\omega = 1, \lambda \rangle 0).(\omega = 1, \lambda \rangle 0) = \sup_{MB, BT} (M_G(\omega = 1, \lambda \rangle 0)). \quad (3.29)$$

Таким образом, в общем виде задача решена.

Рассмотрим её приложения на конкретных примерах.

### 3.5.2. Формальное определение возможностной меры реализации опасности

*Пример 1.* Пусть, с учётом формул для критериев опасности (1.26), (1.28), п. 1.4, множественная форма показателя опасности, формула (3.21), принимает вид:

$$G = BI \cup B = IS \cap IR \cup S \cap R \rangle 0, \quad (3.30)$$

где  $IS, IR$  — дискретные нечёткие величины,  $S, R$  — непрерывные нечёткие величины, описываемые функциями принадлежности:

$$\mu_{IS}(\omega), \mu_{IR}(\omega), \mu_{BI}(\omega), \mu_S(\lambda), \mu_R(\lambda), \mu_B(\lambda), \omega = 0 \vee 1, \lambda \in R^1.$$



Тогда, на основе выполнения этапа 3 алгоритма задачи, рассмотренного в п. 3.4.1, функция принадлежности показателя опасности определяется как:

$$\mu_G = \max_{BM, BT} (\mu_{BI}(\omega), \mu_B(\lambda)) = \max_{BM, BT} (\min_{BT} (\mu_{IS}(\omega), \mu_{IR}(\omega)), \min_{BM} (\mu_S(\lambda), \mu_R(\lambda))). \quad (3.31)$$

Выполняя затем этапы 2 и 4 алгоритма, окончательно получим выражение для возможностной меры реализации предпосылки опасности:

$$\Pi_{G \setminus 0}^{(j)}(\omega = 1, \lambda \setminus 0) = \sup \mu_G(\omega = 1, \lambda \setminus 0). \quad (3.32)$$

*Пример 2.* Рассмотрим пример гомоморфного преобразования из булевого базиса в базис Заде и определения возможностной меры реализации предпосылки, а также, для сравнения, преобразования из булевой в вероятностную форму реализации предпосылки.

Пусть критерий реализации предпосылки задан в виде равенства единице выходной булевой функции ПОЭ

$$y^3 = x_1(x_2 \vee x_3) = 1, \quad (3.33)$$

где  $x, y$  — логические переменные, принимающие значения 0 и 1.

Представим, что  $x_i$  — дискретные нечёткие величины с функциями принадлежности  $\mu_i(\omega)$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Граничные условия задачи имеют вид:  $y = 1$  при  $\omega = 1$ .

Тогда, выполняя этапы 3, 4 алгоритма, определим выражение значения ВМ опасности:

$$\Pi_{y=1}(\omega = 1) = \sup(\min(\mu_1(\omega = 1), \max(\mu_2(\omega = 1), \mu_3(\omega = 1)))) . \quad (3.34)$$

Отметим, что, как в примере 1, для получения численных значений возможностных мер необходимо знание характеристик функций принадлежности или, по крайней мере, знание их значений в точках, указываемых граничными условиями, и в точках пересечения функций принадлежности.

По правилам перехода решётки к замещению ее вероятностной формой [8] преобразуем выражение (3.33) и получим:

$$\begin{aligned} P_{rob}(y = 1) &= p_1 p_2 + p_1 p_3 - p_1 p_2 p_3 = \\ &= p_1(p_2 + p_3 - p_2 p_3), \end{aligned} \quad (3.35)$$

где  $p_1, p_2, p_3$  — есть вероятность равенства единице независимых переменных  $x_1, x_2, x_3$ , т. е.  $p_i = p(x_i = 1)$ .  $\text{Pro}^{xxix}(\dots)$  — оператор вероятности.

Из выражения (3.35) видно, что преобразование решётки в вероятностную форму не является гомоморфным и содержит вычитаемое  $p_1 p_2 p_3$ . Это согласуется с утверждением о вложенности мер, представленном в виде формулы (3.3).

### 3.5.3. Возможностная мера реализации однопараметрической предпосылки

Определим возможностную меру в однопараметрической модели отказа элемента «воздействие — восприимчивость» при условии, что функции принадлежности  $\mu_s(\lambda), \mu_r(\lambda)$ , где  $r, s, \lambda \in R^1$ , заданы, имеют общую область изменения носителя  $\Lambda$ , на которой находятся точка пересечения функций  $\mu_s(\lambda), \mu_r(\lambda)$  и точка перегиба одной из функций, например,  $\mu_r(\lambda)$ , рис. 3.2. Тогда такая задача может интерпретироваться как задача сравнения двух нечётких интервалов с помощью показателей типа «возможность нечётких событий  $\bar{s} \geq \underline{r}$  и  $\bar{s} \geq \bar{r}$ », [11]:

$$\begin{aligned} \Pi_s^{\text{Pos}(\bar{s} \geq \underline{r})}([r, +\infty)) &= \sup_{\lambda} \min(\mu_s(\lambda), \sup_{r \leq s} \mu_r(\lambda)) = \\ &= \sup_{\lambda} \min(\mu_s(\lambda), \mu_r(\lambda)); \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\text{Pos}(\bar{s} \geq \bar{r}) = \sup_{\lambda} \inf_{r \geq s} \min(\mu_s(\lambda), 1 - \mu_r(\lambda)), \quad (3.37)$$

где  $\bar{s}$  — максимально возможное значение воздействия;  $\underline{r}, \bar{r}$  — соответственно минимальное и максимальное возможные значения параметра восприимчивости;  $\text{Pos}(\cdot)$  — обозначение оператора возможностной меры.

При этом значение оператора  $\text{Pos}(\bar{s} \geq \underline{r})$  на основании формулы (3.36) находится по точке пересечения функций принадлежности  $\mu_s(\lambda)$  и  $\mu_r(\lambda)$ , точка 1, рис. 3.2. Значение оператора  $\text{Pos}(\bar{s} \geq \bar{r})$  (формула (3.37)) определяется в точке пересечения функции принадлежности  $\mu_s(\lambda)$  с функцией необходимости  $\eta_r(\lambda) = 1 - \mu_r(\lambda)$ , точка 2, рис. 3.2.

Рассмотренный вариант пересечения нечётких параметров  $s$  и  $r$  при анализе возникновения отказа считается общим. Однако на практике при

асимптотическом анализе достаточно ограничиться нахождением меры типа  $\text{Pos}(\bar{s} \geq r)$ , описываемой формулой (3.37).

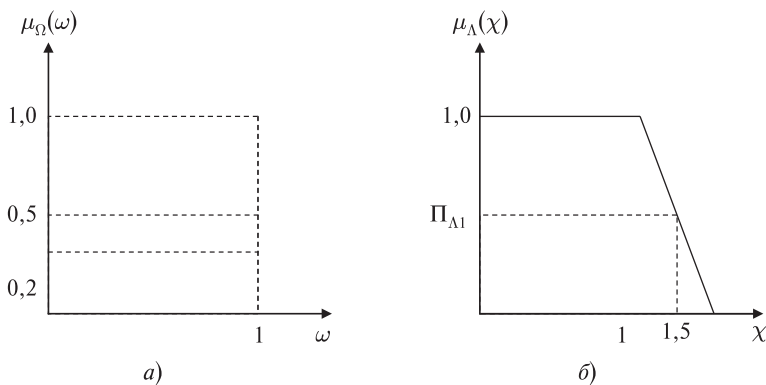


Рис. 3.1

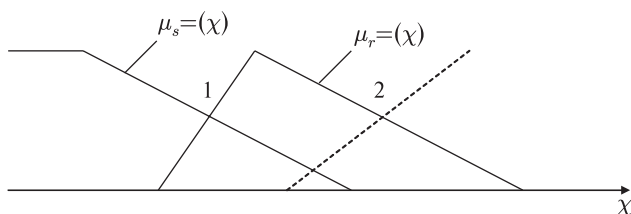


Рис. 3.2<sup>xxx</sup>

### 3.6. Метод установления возможностной меры реализации предпосылок опасности по нечеткой информации о системе

#### 3.6.1. Формулировка задачи

Известно, что на всех этапах жизненного цикла технической системы имеются свои причины, размывающие четкие знания о системе.

Напомним, что с точки зрения анализа и оценки риска нечеткость информации о системе зависит от: 1) полноты описания функционирования объекта и условий среды; 2) погрешности получения информации о параметрах процесса, составляющими которой являются: методологическая,

методическая и информационная; 3) достоверности моделирования и представления данных в виде базисов множеств.

Сформулируем с позиции полученных выше результатов задачу об установлении количественных соотношений между возможностной мерой реализации предпосылок и функций опасности и составляющими нечеткой информации о системе. При этом за основу возьмем параметрическую модель отказа: «нечеткое воздействие  $S$  — нечеткая восприимчивость  $R$ ».

В общем виде задача заключается в определении зависимости меры неопределенности комплекса явлений отказа, описываемых множествами  $B, S, R, A$ :

$$P_B(\Lambda \geq O) = F(\eta, \theta, v, D) \Big| v \rightarrow \max, D \rightarrow \max, \theta \rightarrow \max, \quad (3.38)$$

где  $B = S \cap R$ ,  $B, S, R, \Lambda \in R^1$ ,

$\eta$  — характеристики формы функций принадлежности  $\mu_s(l), \mu_r(l)$ ,

$v$  — характеристики полноты описания задачи,

$D$  — достоверность модели,

$\theta$  — характеристики погрешности получения информации.

При этом условия  $v \rightarrow \max, D \rightarrow \max, \theta \rightarrow \max$  представляют собой требования методологии возможностного анализа и оценки риска системы: полнота и достоверность максимальны, при условии, что погрешность  $\theta$ , описывающая неопределенность разброса параметров  $S$  и  $R$ , считается максимально возможной.

### 3.6.2. Выбор и описание краевых условий

Требование полноты описания задачи может быть достигнуто анализом полного набора вариантов причинно-следственных связей предпосылок (моделей и реализаций в рамках каждой модели) относительно исхода — активного отказа объекта.

На основе предыдущих результатов разделов 2 и 3 полнота определяется представительностью множества параметров воздействий на входах потенциально опасных элементов объекта  $S = (s_{mlk})$  и множества параметров восприимчивости этих элементов объекта  $R = (r_{mth})$ . При этом «методологическая» погрешность анализа появления отказа может быть обусловлена выбором и рассмотрением только параметрической модели отказа элементов объекта. Но поскольку возможностная оценка системы подразумевает учет всех возможных физических факторов и полное опи-

сание восприимчивости объекта к ним, то очевидно, что «методологической» погрешности в анализе отказа в системе нет.

Тогда полнота описания задачи может быть сведена к анализу возможных вариантов соотношения параметров воздействий и восприимчивости в рамках принятой модели.

Получение информации о параметрах модели « $S - R$ » связано с их измерением, преобразованием и представлением в принятой системе данных. В свою очередь, измерение параметров сопровождается инструментальной  $\delta_u$  и методической  $\delta_m$  погрешностями. Информация о преобразовании параметров факторов несет в себе ошибки и неточности определения параметров преобразования факторов в конструкции объекта, которые могут быть описаны в виде погрешности  $f_\delta$  представления множества  $F$ . Погрешности представления параметров относительно отказа физически характеризуются как пространственные  $\delta_r$ , временные  $\delta_t$ , энергетические  $\delta_\epsilon$ , спектральные  $\delta_\omega$ , угловые  $\delta_\theta$ , компонентные  $\delta_{x_i}$  погрешности описания параметров  $S$  и  $R$ .

Достоверность знаний о безопасности системы обуславливается полнотой описания условий задачи и здесь представляется в виде достоверности установления класса безопасности системы [16, 60], в ходе которого требование максимума достоверности оценки  $D \rightarrow \max$  при допущении о наличии ошибки первого рода сводится к условию минимизации (равенстве нулю) ошибки необнаруженного отказа  $\beta^P \rightarrow \min$ , при котором [25, 35]

$$D^P \approx 1 - \beta_{\min}^P \rightarrow \max. \quad (3.39)$$

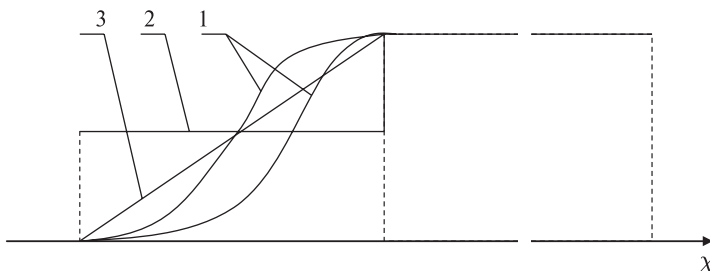


Рис. 3.3

Выразим погрешность  $f_{\delta}$  преобразования параметров  $S$  в виде мультипликативной погрешности. Погрешность измерения и представления любых параметров модели выразим через аддитивные погрешности. Как и в [11], нечеткий параметр опишем интервалом, содержащим **ядро и области размытости**, рис. 3.3. Тогда нечеткие параметры модели можно представить в виде:

$$R = \tilde{R} \pm \Delta_R, \Delta_R = \sum_{i \in I_1} \delta_{iR} \quad (3.40)$$

$$S = f_{\delta S} \tilde{S} \pm \Delta_S, \Delta_S = \sum_{i \in I_2} \delta_{iS}, f_{\delta S} \in [1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon], \delta_{iR}, \delta_{iS}, \varepsilon \in R^1, \varepsilon \in [0, 1), \quad (3.41)$$

где  $\tilde{R}, \tilde{S}$  — ядра нечетких параметров  $S$  и  $R$ ,

$\Delta_R, \Delta_S$  — суммарные аддитивные погрешности представления параметров  $S$  и  $R$ ,

$\delta_{iR}, \delta_{iS}$  — составляющие аддитивные погрешности измерения и представления этих параметров,  $I_1, I_2$  — множество номеров составляющих погрешности,

$\varepsilon$  — действительное, сколь угодно малое положительное число, меньшее единицы.

Следовательно, выражения (3.40), (3.41) описывают формальное замещение «четких» параметров  $S$  и  $R$  нечеткими множествами, заданными на носителях:

$$\left[ \tilde{R} - \Delta_R, \tilde{R} + \Delta_R \right] \text{ с ядром в } \tilde{R}, \quad (3.42)$$

$$\left[ f_{\delta S} \tilde{S} - \Delta_S, f_{\delta S} \tilde{S} + \Delta_S \right] \text{ с ядром в } (1 - \varepsilon) \tilde{S}. \quad (3.43)$$

Предположим, что в области ядер выполняется условие нормальности нечетких множеств:  $\mu_s(l) = \mu_r(l) \equiv 1$ . За пределами ядра на носителе функции принадлежности меньше единицы, например для  $R$ :  $0 \leq \mu_r(l) < 1$ .

В рамках теории возможностей и теории вероятностей для известной системы можно использовать следующие правила выбора формы функции принадлежности нечеткой величины:

- 1) если явления исследованы экспериментально, то ФП определяется на основе обработки результатов экспериментов;

- 2) если явления исследованы экспериментально-теоретическими методами, то форма ФП параметров модели определяется на основе функций вероятности;
- 3) если явления исследованы теоретически, например с помощью вероятностного анализа, то вид ФП определяется из класса гипотетических функций.

При этом из нескольких гипотез о формах ФП  $\{\mu_i(l)\}$  по правилу суммирования алгебры Заде определяется одна:

$$(\mu_{\cup}(l) = \mu_1(l), \mu_2(l) \dots). \quad (3.44)$$

Если же имеется ФП как самое слабое свидетельство о распределении возможности проявления нечеткой величины, например, для  $R$ ,  $\mu_R(l)$ , такое что:

$$\mu_R(l) = \mu_{\cup R}(l), \quad (3.45)$$

означающее, что данная функция  $\mu_R(l)$  «поглощает» все остальные варианты распределения параметра  $R$  (все другие слагаемые в зависимости (3.45)), то для анализа достаточно остановиться на ее рассмотрении и определении характеристик ее формы.

При рассмотрении форм ФП  $\mu_{\cup R}(l)$  могут иметься следующие «крайние» и «средний» варианты, иллюстрируемые на примере (рис. 3.3), где цифрами обозначены: 1 — функция Гаусса, 2 — ступенчатая функция, 3 — линейная функция, представляющие функции распределений случайной величины, соответственно, нормального, равновероятного и Симпсона.

Григорьев и Дюбуа использовали линейную форму ФП нечеткой величины в виде формы трапеций [11]. Действительно, физически всегда оправдано, что возможность появления значения  $R$ , например, на самой нижней границе  $R_H$  весьма мала и стремится к нулю:  $\mu_R(l = R_H) \rightarrow 0$ , тогда как возможность появления значения  $R_2$  вблизи ядра ( $R_B$ ) приближается к единице:  $\mu_R(l = R_2) \rightarrow 1$ .

Аналогичные рассуждения можно привести для других вариантов нечеткой величины  $R$  и для других нечетких величин.

Таким образом, в предположении о существовании одной «поглощающей» формы функции принадлежности нечеткой величины, которая выражается нормальной трапецией, для однозначного задания ее сторон достаточно найти значения границ ядра и носителя.

Связывая проведенные рассуждения с зависимостями (3.42), (3.43), легко получить следующие теоретические формы ФП параметров  $S$  и  $R$  (рис. 3.4).

Однако в практике параметрического анализа отказа объекта чаще всего интересует область возможного перекрытия (пересечения) параметров  $S$  и  $R$ . Это можно описать прямоугольными трапециями вида рис. 3.5, где нижнее значение ядра воздействия равно  $\tilde{S}_1 = 0$ , верхнее значение ядра восприимчивости объекта к воздействию равно максимально-му физически реализуемому его значению в системе:  $\tilde{R}_2 = S_{pp}$ , и, вследствие неопределенности информации, возможно превышение верхнего значения  $S_B$  параметра воздействия над нижним значением  $R_H$  параметра восприимчивости, т. е. могут перекрываться функции  $\mu_s(l)$  и  $\mu_r(l)$ .

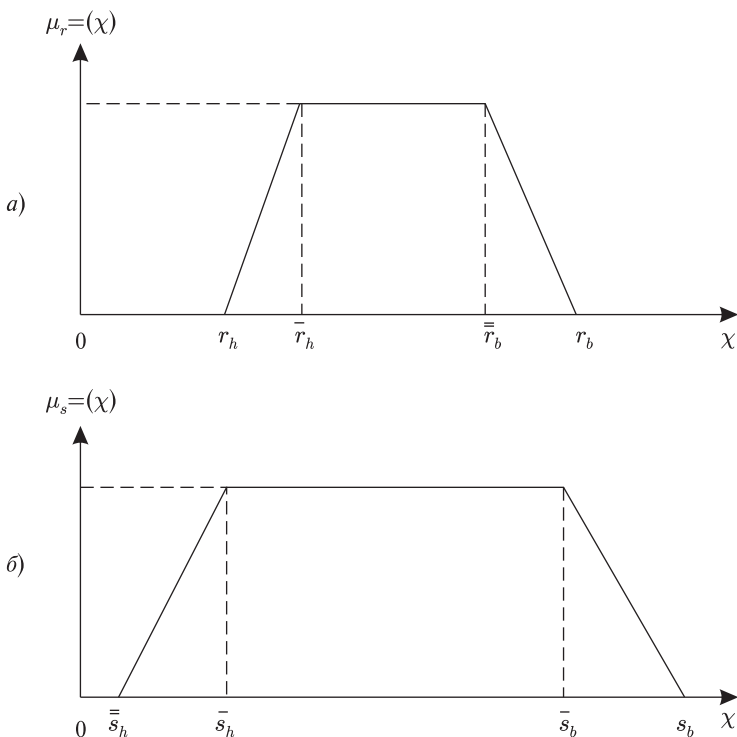


Рис. 3.4



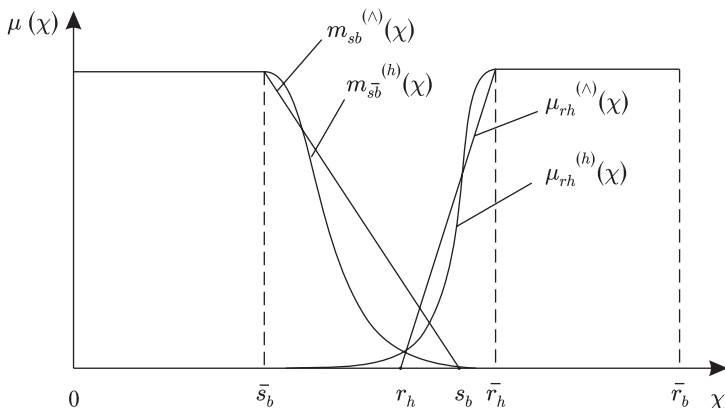


Рис. 3.5

### 3.6.3. Детальное описание нечеткой модели системы

Перейдем к детальному описанию модели «нечеткое воздействие — нечеткая восприимчивость». Пусть каждая составляющая этой модели представлена одним параметром, причем эти параметры одной размерности, так что  $R, S, i \in R^1$ , где каждый параметр есть размерная переменная, заданная на области действительных чисел  $R^1$ . Графически представим модель так, чтобы рассмотреть все физически возможные варианты перекрытия нечетких величин (см. п. 3.3). Предположим, что области изменения воздействия и восприимчивости (носители нечетких величин) следующие:  $[0, S_B]$ ,  $[r_H, r_{\max}]$ , и что их ядра представлены отрезками:  $[0, S_H]$ ,  $[r_B, r_{\max}]$  (рис.3.5), где  $S_H, S_B$  соответственно верхнее значение ядра и носителя нечеткой величины  $S$ ,  $r_H$  — нижнее значение носителя нечеткой величины  $r$ ,  $r_H$  и  $r_B$  — нижнее и верхнее значения ядра нечеткой величины  $r$  причем  $r_{\max} = s_{pp}$ , что означает: максимальная восприимчивость объекта к отказу выражается через значение физически реализуемого воздействия, непосредственно прикладываемого к нему. Таким образом, нечеткие величины  $S$  и  $R$  описаны в виде функций принадлежности  $\mu_s(l)$  и  $\mu_r(l)$  и представлены на рис. 3.5.

Требование полноты анализа в рамках принятой модели сводится к перебору следующих вариантов типов изменения параметров:

- |                                |   |   |
|--------------------------------|---|---|
| 0) $r, s - \text{const}$ ,     | 1) $r - \text{const}, s - \text{var}$ , | 1.1) $S_H - \text{const}, S_B - \text{var}$ , |
| 1.2) $S_H, S_B - \text{var}$ , | 2) $s - \text{const}, r - \text{var}$ , | 2.1) $r_B - \text{const}, r_H - \text{var}$ , |

- 2.2)  $r_B, r_H - \text{var}$ , 3)  $r, s - \text{var}$ , 3.1)  $s_H, r_B - \text{const}$ ,  $s_B, r_H - \text{var}$ ,  
 3.2)  $s_H, r_B - \text{var}$ ,  $s_B, r_H - \text{const}$ , 3.3)  $s_H, s_B, r_H - \text{var}$ ,  $r_B - \text{const}$ ,  
 3.4)  $s_B, r_H, r_B - \text{var}$ ,  $s_H - \text{const}$ , 3.5)  $s_H, s_B, r_H, r_B - \text{var}$ .

Выше было показано, формулы (3.44), (3.45), что в рамках возможностной оценки допустимо использовать самую общую форму ФП. Поэтому рассмотрение всех возможных вариантов соотношения нечетких величин  $r$  и  $s$  (требование полноты анализа) может быть сведено к анализу варианта 3.5, рис. 3.6. Достоверность  $D^{BO}$  оценки безопасности однопараметрического объекта представляет собой функцию от возможностной меры работоспособного состояния объекта и вероятностной меры ошибок 1 и 2 рода [25, 56, 58]:

$$^{xxxiv} D^{BO} = \Pi(S < R) \cdot (1 - \alpha - \beta), \quad (3.46)$$

где на основе свойства дополнения ВМ

$$\Pi(S < R) = 1 - \Pi_B(\Lambda \geq O). \quad (3.47)$$

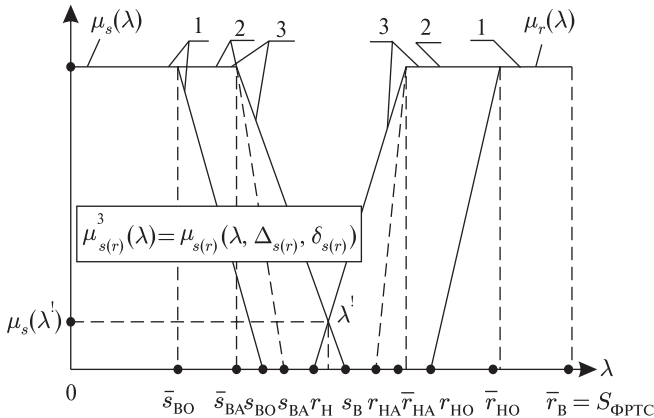


Рис. 3.6

При отсутствии ошибки 1 рода,  $\alpha = 0$ , пренебрегая бесконечно малыми 2 порядка малости, из (3.46), (3.47) получим:

$$D^{BO} = 1 - \beta - \Pi_B(\Lambda \geq O). \quad (3.48)$$

При однопараметрическом представлении выражение (3.48) связывает показатель достоверности существования безопасного состояния системы с вероятностными мерами активного отказа  $\Pi_B(\Lambda \geq O)$  и необнаруженного активного отказа  $\beta$ . Как следует из (3.48), рассматриваемые события образуют «псевдополную» группу событий, характеризующуюся квазитожеством:  $D^{BO} + \beta + \Pi_B(\Lambda \geq O) = 1$ , что согласуется с краевыми условиями рассматриваемой задачи.

### 3.6.4. Вывод зависимости вероятностной меры отказа в однопараметрической системе

#### 3.6.4.1. Общее решение

Из общей постановки задачи, формула (3.38), следует, что в случае однопараметрической системы требуется определить зависимость:

$$P_b(l \geq 0) = f(\eta, \theta) \quad (r, s - \text{var}, \beta \rightarrow \min, \theta \rightarrow \max), \quad (3.49)$$

где  $b = r \cap s$ ,  $b, r, s, l \in R^1$ ,

$\eta$  — характеристики прямоугольно-трапецидальной формы ФП параметров  $s$  и  $r$ , устанавливаемые для  $\mu_s(l): s_b, d_s$ , для  $\mu_r(l): r_H, d_r$ ,

$d_s, d_r$  — начальный диапазон неопределенности величин  $s$  и  $r$  (длина абсциссы стороны трапеции  $\mu_s, \mu_r$ ),  $d_s = s_B - \bar{s}$ ;  $d_r = \bar{r} - r_H$ ;

$\theta$  — характеристики составляющих погрешности получения информации о параметрах  $s$  и  $r$ , представленных формулами (3.40), (3.41).

Требование учета максимального значения погрешностей представления составляющих модели на всем диапазоне их определения,  $\theta \rightarrow \max$ , сводится к следующему:

- 1) выбирается такая сторона трапеции  $\mu_s(l)$ , которая образована переносом значения  $S_B$  из-за аддитивной погрешности  $\Delta s$  вправо (в сторону увеличения):

$$S_{BA} = S_{BO} + \Delta s, \quad (3.50)$$

где  $S_{BO}$ ,  $S_{BA}$  — соответственно «действительное» и неточное, из-за аддитивной ошибки, значения верхней границы параметра  $S$ ,

- 2) аддитивная погрешность  $\Delta_r$  величины  $r$  в функции  $\mu_r(l)$  учитывается путем переноса стороны трапеции  $\mu_r(l)$  влево (в сторону уменьшения)

$$r_{HA} = r_{HO} + \Delta_r \quad (3.51)$$

где  $r_{HO}$ ,  $r_{HA}$  — действительное и неточное значения нижней границы параметра  $r$ ,

- 3) мультипликативная погрешность  $f_{\delta s}$  ( $f_{\delta r}$ ) величины  $s$  ( $r$ ) в функции  $\mu_s(l)$  ( $\mu_r(l)$ ) учитывается путем изменения наклона стороны трапеции, вызванного переносом верхней границы  $s_B$  ( $r_H$ ) вправо (влево):

$$s_B = s_{BO} (1 + \varepsilon_s), \quad r_H = r_{HO} (1 - \varepsilon_s), \quad (3.52)$$

- 4) предполагается, что аддитивная и мультипликативная погрешности независимы.

Описанные здесь условия, раскрывающие требование  $\theta \rightarrow \max$ , иллюстрируются на рис. 3.6.

Тогда с учетом граничных условий (3.50)–(3.52) и условия о том, что аддитивная  $A$  и мультипликативная  $M$  погрешности независимы, уравнения функций принадлежности имеют вид:

$$\mu_s(l) = \frac{1}{d_{so} + \varepsilon_s s_{BO}} \left( (1 + \varepsilon_s) s_{BO} + \Delta_s - l \right), \quad (3.53)$$

$$\mu_r(l) = \frac{1}{d_{ro} + \varepsilon_r s_{HO}} \left( l - r_{HO} (1 - \varepsilon_H) s_{BO} - \Delta_r \right). \quad (3.54)$$

Из уравнений (3.53), (3.54) выразим параметрический критерий опасности и запас безопасности системы. Действительно, отказ не произойдет, если:

$$s_{BO} + \varepsilon_s s_{BO} + \Delta_s < r_{HO} - \varepsilon_r r_{HO} - \Delta_r. \quad (3.55)$$

Обозначая параметрический запас безопасности как:

$$PZB = r_{HO} - s_{BO}, \quad (3.56)$$

из условия (3.55) выразим параметрический критерий возможности отказа из-за наличия ошибок и нечеткого представления информации в виде:

$$\varepsilon_s s_{BO} + \varepsilon_r r_{HO} + \Delta_s + \Delta_r \geq PZB. \quad (3.57)$$

Если нечеткие величины и привнесенные погрешности их представления таковы, что критерий (3.57) выполняется, то возможно выполнение условия  $s_B \geq r_H$ . Тогда, опуская промежуточные выкладки, общее решение системы уравнений (3.53), (3.54) получим в виде:

$$l' = \frac{(\varepsilon_r + \varepsilon_s) s_{BO} r_{HO} + d_{rO} s_{BO} + d_{sO} r_{HO} + (\varepsilon_s s_{BO} d_{rO} - \varepsilon_r r_{HO} d_{sO})}{A} + \frac{(\Delta_s d_r - \Delta_r d_s) + (\varepsilon_r r_{HO} \Delta_s - \varepsilon_s s_{BO} \Delta_r)}{A}, \quad (3.58)$$

где  $A = d_r + d_s + \varepsilon_s s_{BO} + \varepsilon_r r_{HO}$ .

Точка  $l'$  есть точка пересечения функций принадлежности  $\mu_s(l)$  и  $(\mu_r(l))$  (см. рис. 3.6), в ней возможностная мера отказа максимальна.

В частности, если диапазон неопределенности параметров равен нулю:  $d_r = d_s = 0$ , а аддитивные и мультипликативные погрешности равны:  $\Delta_s = \Delta_r$ ,  $\varepsilon_s s_{BO} = \varepsilon_r r_{HO}$ , то точка пересечения ФП находится по формуле:

$$l' = \frac{(\varepsilon_r + \varepsilon_s) s_{BO} r_{HO}}{\varepsilon_s s_{BO} + \varepsilon_r r_{HO}}. \quad (3.59)$$

В этом случае аддитивные погрешности параметров  $s$  и  $r$  компенсирует друг друга, поэтому в выражении (3.59) они отсутствуют.

Подставляя решение (3.58) или (3.59) в зависимость ФП, например  $\mu_s(l)$ , получим зависимость возможностной меры отказа элемента от характеристик погрешностей однопараметрического представления воздействия и восприимчивости:

$$P_s(l') = \mu_s(l') = \frac{1}{d_s \varepsilon_s s_{BO}} \left( (1 + \varepsilon_s) s_{BO} + \Delta_s - l' \right). \quad (3.60)$$

### 3.6.4.2. Определение возможностной меры по интегральной аддитивной погрешности параметров $R$ и $S$ .

Пусть все погрешности параметров  $S$  и  $R$  представлены интегральными аддитивными погрешностями в виде:

$$\Delta_S = S_B - \bar{S}; \quad \Delta_r = \bar{r} - r_H, \quad (3.61)$$

где  $\bar{S}, \bar{r}, \bar{S}_B, \bar{r}_H$  — соответственно верхнее и нижнее значения ядер и границ нечётких параметров воздействия и восприимчивости.

Параметрический запас безопасности по отказу в данной модели обозначим:

$$Zb = \bar{r} - \bar{S},$$

причём, как и ранее, считается, что  $Zb < \Delta_S + \Delta_r$ .

Требуется определить возможностную меру отказа как функцию вида  $\pi! = f(\Delta_S, \Delta_r, Zb)$ .

Решение. Представим нечёткие величины  $S$  и  $r$  функциями принадлежности  $\mu_S(\lambda), \mu_r(\lambda)$  в виде трапеций (рис. 3.7) и рассмотрим треугольники  $ABC, CDE, CLN, CLM$ .

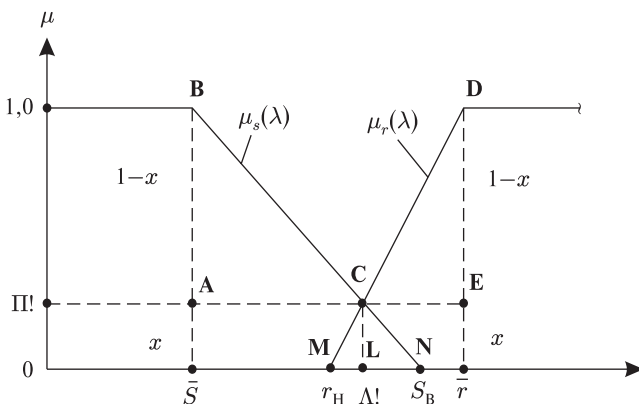


Рис. 3.7

Очевидно, что они образуют следующие пары подобных треугольников:

$$ABC, CLN; \quad CDE, CLM.$$

Обозначим стороны треугольников как  $CL = x$ ,  $AB = 1 - x$ , а  $\lambda! = y$ .

Из подобия треугольников следует:

$$\frac{x}{1-x} = \frac{S_B - y}{y - S} = \frac{y - r_H}{r - y}. \quad (3.62)$$

Выражение (3.62) преобразуем к виду:

$$(S_B - y)(\bar{r} - y) = (y - r_H)(y - \bar{S}),$$

из которого получим:

$$y = \frac{S_B \bar{r} - r_H \bar{S}}{\Delta_S + \Delta_r}. \quad (3.63)$$

Вернёмся к выражению (3.62) и запишем  $x(y - \bar{S}) = (1 - x)(S_B - y)$ .

Из последнего выражения найдём  $x$ :

$$x = (S_B - y) / \Delta_S. \quad (3.64)$$

После подстановки (3.63) в выражение (3.64) и несложных преобразований получим формулу возможностной меры отказа в виде:

$$\pi ! = \frac{S_B - r_H}{\Delta_S + \Delta_r} = 1 - \frac{Zb}{\Delta_S + \Delta_r} \quad (3.65)$$

На основании произведенного вывода можно сформулировать следующие утверждения:

1. В параметрической модели предпосылок опасности «нечеткое воздействие  $s$  — нечеткая восприимчивость  $r$ » при условии максимума её полноты и достоверности и с учётом выбора максимально неблагоприятного варианта сочетания погрешностей представления этих параметров **возможностная мера** реализации предпосылки есть *отношение интервала пересечения* нечётких параметров воздействия  $s$  и восприимчивости  $r$  к **суммарной абсолютной погрешности**  $\Delta_S + \Delta_r$  их представления.
2. **Возможностная мера** реализации предпосылки опасности есть *разность* между **суммарной абсолютной погрешностью** представления характеризующих опасность параметров и параметрическим **запасом безопасности**, *отнесённая* к этому **запасу**.
3. При представлении нечетких параметров воздействия, восприимчивости и инициирования как *ограниченных сверху* множеств реализация предпосылки опасности **невозможна**, если **суммарная абсолютная погрешность** этих параметров *меньше* его <sup>xxxvii</sup> **параметрического запаса** безопасности  $\Delta_S + \Delta_r < Zb$ .

### 3.6.4.3. Установление аналитического выражения возможностной меры реализации критической функции опасности

Используя полученную формулу (3.65) для ВМ реализации элементарной предпосылки, на основе операций сигнатуры алгебры нечетких множеств  $A_3$  произведем гомоморфное преобразование функции связности элементов относительно критического элемента объекта (2.29) в формулу возможностной меры отказа объекта как функции от ВМ отказа элементов. То есть при следующих условиях преобразования:

$$\left. \begin{aligned} \text{Pos}(y_{N_{BbLX}}(T_1) = 1) &= \pi_{N_{RM}}(T_1); \\ \text{Pos}(y_{to} = 1) &= \pi_{to}; \\ \text{Pos}(Z_t = e_t x_t = 1) &= \pi(s_t, r_t, \Delta_{st}, \Delta_{rt})|e_t = 1 \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

требуется определить зависимость вида:

$$\pi_{N_{BbLX}}(T_1) = f_{S_3}(\pi_{to}, \pi(s, r, \Delta_s, \Delta_r) B_m, t \in T_1), \quad (3.67)$$

где  $f_{S_3}$  — условная запись функции связности возможностных мер отказа элементов, заданной на сигнатуре  $S_3$  алгебры Заде.

*Решение.* По аналогии с выводом зависимости (2.28) решим задачу методом индукции. Для этого применим к зависимости (2.23) условия преобразования (3.66) и получим:

$$\text{Pos}(y_n = 1) = \text{Pos}(y_0 = 1 \wedge (\dots) = 1) = \min(\pi_0, \pi(\dots)). \quad (3.68)$$

В свою очередь, запишем, что:

$$\pi(\dots) = \max\{\pi(b_m)\}, \quad (3.69)$$

где по формуле (2.24)  $B_m$  — есть упорядоченный булеан, причём его элементы с учётом формулы (3.65) определяются в виде:



$$\begin{aligned}
 \pi(B_1 = 04) &= \frac{S_0 \cap r_4}{\Delta_{S_0} + \Delta_{r_4}}; \\
 \pi(B_2 = 014) &= \min(\pi_{01}, \pi_{14}) = \min\left(\frac{S_0 \cap r_1}{\Delta_{S_0} + \Delta_{r_1}}, \frac{S_1 \cap r_4}{\Delta_{S_1} + \Delta_{r_4}}\right); \\
 \pi(B_3 = 023) &= \min(\pi_{02}, \pi_{23}) = \min\left(\frac{S_0 \cap r_2}{\Delta_{S_0} + \Delta_{r_2}}, \frac{S_2 \cap r_3}{\Delta_{S_2} + \Delta_{r_3}}\right); \\
 &\dots \\
 \pi(B_8 = 01234) &= \min(\pi_{01}, \pi_{12}, \pi_{23}, \pi_{34}).
 \end{aligned} \tag{3.70}$$

Далее, объединяя формулы (3.69), (3.70), зависимость (3.68) представим в виде:

$$\pi_{N=4} = \min(\pi_0, \max_m (2^{N-2} \pi(B_m))), \tag{3.71}$$

где  $\pi_0$  — возможностная мера действия на объект внешнего фактора;  
 $\pi(B_i) = \pi(S_0, S_i, \Delta_{S_0}, \Delta_{S_i}, r_N, \Delta_{r_N} \dots)$  — возможностная мера существования параметрической цепочки  $0-i-N$ .

Действуя по индукции, зависимость (2.28) преобразуем к виду:

$$\begin{aligned}
 \pi(N_{\text{вых}}, T_1, f_{S_3}) &= \text{Pos}(y_{N_{\text{вых}}}(T) = 1) = \\
 &= \max_{t \subset T_1} (\min(\pi_{t_0}, \max_m (2^{N_{\text{вых}}-2} \pi_t(B_m)))),
 \end{aligned} \tag{3.72}$$

где возможностные аргументы  $\pi_t(B_i)$  раскрываются по формулам (2.23), (2.27), (3.70).

Таким образом, получена точная компактная формула возможностной меры отказа объекта как функции от ВМ отказа элементов с учётом их связности.

Осуществим преобразование формулы (3.72) для двух случаев:

- а) если в объекте связность и накопление по отказам элементов отсутствуют, тогда:

$$\pi(N_{\text{вых}}, T_1, f_{S_3}^{(1)}) = \max_{t \subset T_1} (\min(\pi_{t_0}, \pi_t(ON_{\text{вых}}))); \tag{3.73}$$

- б) если связность и каналирование в объекте однократные, вида:

$$(0 - i - N_{\text{Вых}}), \quad i = 1, N_{\text{Вых}} - 1,$$

тогда:

$$\pi(N_{\text{Вых}}, T_1, f_{S_3}^{(2)}) = \max_{t \in T_1} (\min(\pi_{t_0}, \max_{i=1}^{N_{\text{Вых}}-1} (\pi_i(OiN_{\text{Вых}}))))). \quad (3.74)$$

Формула (3.73) определяет ВМ отказа объекта только по отказу его выходного (критического) элемента, инициированного действием внешних факторов, принадлежащих к множеству видов  $T_1$ .

В свою очередь, формула (3.74) описывает ВМ отказа критического элемента объекта, инициированного однократными действиями вторичных факторов от каждого его ПОЭ, отказавшего при действии внешних факторов, при условии принадлежности внешних и вторичных факторов к множеству видов  $T_1$ .

И, наконец, если искусственно предположить, что внешние факторы в среде возникают с мерой  $\pi_{t_0} = 1, \forall t \in T_1$ , тогда получим формулу возможностной меры возникновения «собственного» отказа объекта при однократном действии его вторичных факторов:

$$\pi(N_{\text{Вых}}, T_1, f_{S_3}^{(C)}) = \max_{t \in T_1} (\max_{u=1}^{N_{\text{Вых}}-1} (\pi(t(iN_{\text{Вых}}))))), \quad t \in T_1. \quad (3.75)$$

Таким образом, полученные зависимости (3.73)–(3.75) доказывают универсальность формулы (3.72) и при адекватном множественно-параметрическом представлении техногенных (экологических) систем относительно сопоставимого исхода аварийной (чрезвычайной) ситуации могут быть использованы для сравнения их опасности (безопасности).

### **3.7. Определение возможностной меры реализации параметрической предпосылки по границам размытости и уровням различимости**

В большинстве практических случаев эксперты могут получить с некоторой степенью уверенности исходные данные о модели отказа в виде границ ядер и носителей нечетких величин [21, 47, 49], но не о виде их функций принадлежности, что затрудняет применение общего подхода [11]. В таких условиях важным оказывается обоснование видов функций принадлежности по отношению ко всему диапазону изменения исходных данных [39, 42].

В свою очередь, при отыскании значений меры отказа от 0,03 и ниже большое значение приобретает как анализ краевых условий задачи, так и анализ их влияния на результат её решения.

Рассматривается задача об определении условий существования решения и нахождении меры реализации критерия отказа  $t: s > r$ , если параметры  $s, r$  — нечеткие величины, ядра которых заданы, а границы их носителей установлены на уровне  $\alpha$ -среза. При отсутствии статистических данных о параметрах системы «факторы — объект» оценка меры определенности отказа в ней может быть произведена только по величине возможностной меры [39]. При этом оказывается важным выяснение условий, для которых решение такой задачи осуществимо в интересующих для практики диапазонах изменения параметров системы.

### 3.7.1. Постановка задачи

Рассматривается уникальная система «ОВФ — ПОО — СМЗ». Произведем оценку её безопасности путем построения параметрической модели «нечеткое воздействие  $s$  — нечеткая чувствительность  $r$ », на основе которой установим меру определенности реализации критерия «воздействие фактора превышает чувствительность объекта,  $t: s > r$ ». Статистические данные о разбросе нечетких параметров отсутствуют, но экспертным путем установлены:

области для ядер нечетких величин  $s, r$ , обозначаемых в виде:

$$\bar{s} \in [0, \bar{s}_h], \quad \bar{r} \in [r_b, \bar{r}_h];$$

области для носителей этих величин на уровне их  $\alpha$ -среза [11], рис. 3.8:

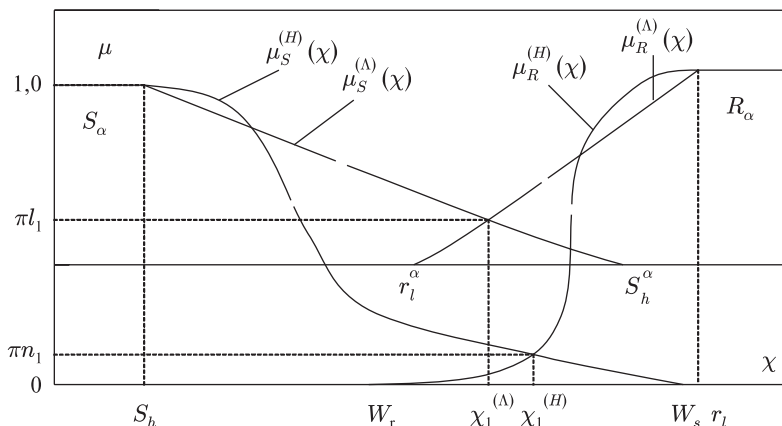


Рис. 3.8



$$R_\alpha = \{\chi \mid \chi \in X, \mu_R(\chi) \geq \alpha : r_l^\alpha, \bar{r}_l, \bar{r}_h\}; \quad (3.76)$$

$$S_\alpha = \{\chi \mid \chi \in X, \mu_S(\chi) \geq \alpha : \bar{s}_l = 0, \bar{s}_h, s_h^\alpha\}. \quad (3.77)$$

Причем в зависимостях (3.76) и (3.77) под границами  $r_l^\alpha, s_h^\alpha$  носителей  $R_\alpha, S_\alpha$  будем подразумевать «ничтожно» возможные значения нечетких величин  $r$  и  $s$ , которые эксперты различают со степенью уверенности, равной  $1 - \alpha$ , где  $\alpha$  — уровень различимости этих границ. Отметим, что для решения задачи в рамках указанной модели вполне достаточно для «верхней»  $s_h$  и «нижней»  $r_l$  границ ядер задать условие:  $s_h < r_l$ .

С учетом априорной информации о размытости величин  $s, r$  предположим, что их функции принадлежности являются монотонными функциями.

В частности, рассмотрим линейную <sup>xxxviii</sup>  $\mu^{(n)}(\chi)$  (рис. 3.9) и гауссову (нормальную)  $\mu^{(n)}(\chi)$  (рис. 3.8) функции принадлежности. Известно, что такие функции принадлежности описывают варианты либо полного незнания характера размытости, либо «нормальной» размытости величин [11, 21].

Требуется найти асимптотическое значение меры определенности отказа как функции от 1) границ  $\bar{r}_l, \bar{s}_h$  ядер, 2) границ  $r_l^\alpha, s_h^\alpha$  носителей нечетких параметров  $r, s$ , а также от 3) уровня  $\alpha$  различимости этих границ.

### 3.7.2. Решение задачи для трех вариантов граничных условий

Рассмотрим решение задачи для трёх вариантов (условий) соотношения границ «ничтожно» возможных значений параметров воздействия и чувствительности:

$$1) r_l^\alpha < s_h^\alpha, 2) r_l^\alpha = s_h^\alpha, 3) r_l^\alpha > s_h^\alpha. \quad (3.78)$$

Рассмотрим первый вариант соотношения границ и определим возмозможностную меру в линейной аппроксимации функций принадлежности нечетких параметров  $s$  и  $r$  на уровне  $\alpha$ -среза (рис.3.9).

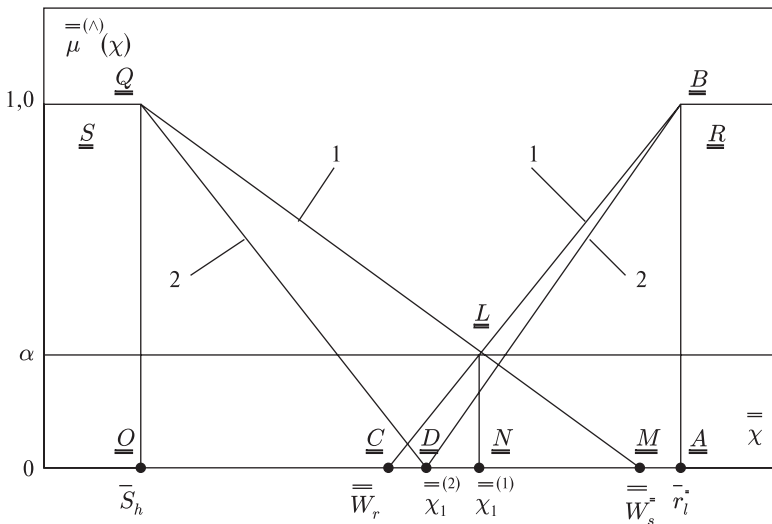


Рис. 3.9<sup>xxxix</sup>

Для этого случая, как показано в п. 3.5, возможностная мера  $\pi l_1$  отказа есть отношение длины интервала пересечения  $[r_l^\alpha, s_h^\alpha]$  носителей к сумме длин областей размытости  $\Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha$ , взятых по  $\alpha$ -срезу параметров модели отказа:

$$\pi l_1 = \pi l_\alpha = (s_h^\alpha - r_l^\alpha) / (\Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha) = 1 - zb / (\Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha) = 1 - \bar{z}b_\alpha, \quad (3.79)$$

где длины «практических» областей размытости определяются по зависимостям:

$$\Delta_s^\alpha = s_h^\alpha - \bar{s}_h, \Delta_r^\alpha = \bar{r}_l - r_l^\alpha. \quad (3.80)$$

Параметры  $zb = \bar{r}_l - \bar{s}_h$  и  $\bar{z}b_\alpha = zb / \Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha$  называются, соответственно, абсолютный и приведенный параметрические «запасы безопасности».

Из формулы (3.80) следует, что если  $\bar{z}b_\alpha = 1$ , т. е. если  $\bar{r}_l - \bar{s}_h = \Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha$  тогда  $\pi l_\alpha = 0$ .

Следовательно, в линейном приближении возможностная мера отказа равна нулю, если сумма областей размытости равна и больше параметрического запаса безопасности, а решение существует, если  $\bar{z}b_\alpha \leq 1$ .

Кроме того, как видно из рис.3.8 и 3.9, существование неполной различимости границ с уровнем  $\alpha > 0$  обуславливает наличие неустранимой погрешности в определении меры отказа, которая в линейной аппроксимации равна уровню различимости:  $\pi l_\alpha = \alpha$ .

С другой стороны, если будет считаться, что  $\alpha > 0$ , хотя в действительности имеет место вариант 2 или 3 зависимости (3.78), см. ветви (2) на рис. 3.9, то это может привести к «ложному решению» — к принятию варианта (1) в условии (3.78) задачи.

Если будут выявлены «абсолютно невозможные» величины  $w_r$ ,  $w_s$ , которые соответствуют уровню различимости  $\alpha = 0$ , рис. 3.8, то потенциальная ошибка нахождения  $\pi$  равна (стремится к) нулю.

Исследуем влияние уровня  $\alpha$ -различимости границ параметров модели отказа на аргумент  $zb_\alpha$  в предположении о том, что их функции принадлежности линейны вплоть до нуля, рис. 3.9. Выразим длины интервалов размытости  $\Delta_s^w = \chi^{(2)}_1 - \bar{s}_h$  и  $\Delta_r^w = \bar{r}_l - \chi^{(2)}_1$ , взятые по уровню  $\alpha = 0$  (точка  $D$  в ветвях (2) функций принадлежности  $\mu_s(\chi)$  и  $\mu_r(\chi)$ ), через длины интервалов  $\Delta_s^\alpha$ ,  $\Delta_r^\alpha$  ветвей (1), рис. 3.9, и значение  $\alpha$ -уровня. Из рассмотрения двух пар подобных треугольников OQM, NLM и ABC, NLC на области значений  $0 \leq \alpha \leq 0,1$  можно получить следующие соотношения:

$$\Delta_s^w = \Delta_s^\alpha / (1 - \alpha); \quad \Delta_r^w = \Delta_r^\alpha / (1 - \alpha). \quad (3.81)$$

Просуммировав соответствующие левые и правые части соотношений (4.91) и разделив их на  $zb$ , в результате несложных преобразований получим:

$$\bar{zb}_w = \bar{zb}_\alpha (1 - \alpha); \quad \bar{zb}_\alpha \approx \bar{zb}_w (1 + \alpha). \quad (3.82)$$

Как следует из зависимости (3.82), приведенный параметрический запас  $\bar{zb}_w$  линейно зависит от уровня  $\alpha$ .

### 3.7.3. Возможностная мера при гауссовой аппроксимации ФП параметров

Определим возможностную меру при *нормальной (гауссовой)* аппроксимации функций принадлежности нечетких параметров  $s$  и  $r$ :

$$\begin{aligned} \mu_s(\chi) &= \exp(-0,5 ((\chi - \bar{s}_h) / \sigma_s)^2); \quad \mu_r(\chi) = \\ &= \exp(-0,5 ((\chi - \bar{r}_l) / \sigma_r)^2), \end{aligned} \quad (3.83)$$

где  $\sigma_s$  ( $\sigma_r$ ) — характеристика размытости соответственно параметров  $s$ ,  $r$ , связанная с практической областью размытости  $\Delta_s$  ( $\Delta_r$ ) соотношением:

$\Delta = k \cdot \sigma$ , где  $k$  — коэффициент нормальной размытости, которому при  $k = 3$ ; 4; 5 соответствует квантиль доверия  $1 - v$ : 0,9968; 0,999968; 0,9999997 [26].

По определению [11], возможностная мера превышения  $s$  над  $r$  есть значение функций принадлежности в их точке пересечения  $\chi_1$ . Тогда, как видно из рис. 3.8:

$$\pi n_1 = \mu_S(\chi^{(n)}_1) = \mu_R(\chi^{(n)}_1). \quad (3.84)$$

После подстановки (3.83) в (3.84), с учетом обозначений в формулах (3.79) и (3.80), получим следующую зависимость «нормальной» аппроксимации возможностной меры:

$$\pi n_\alpha = \exp(-k_e((\bar{r}_l - \bar{s}_h) / (\Delta^\alpha_s + \Delta^\alpha_r))^2) = \exp(-k_e \bar{z}b_\alpha^2), \quad (3.85)$$

где  $k_e = k/2$ , а значения коэффициента  $k_e = 4,5; 8; 12,5$  соответствуют значениям коэффициента  $k = 3; 4; 5$  в формуле (3.83).

Результаты численного решения зависимости (3.85) представлены на рис.3.10. Как видно из рис. 3.10, влияние аргумента  $\bar{z}b_\alpha$  на функцию  $\pi n_\alpha$  слабее, нежели влияние коэффициента  $k_e$ . При изменении  $k_e$  от 4,5 до 12,5 происходит изменение  $\pi n_\alpha$  на несколько порядков.

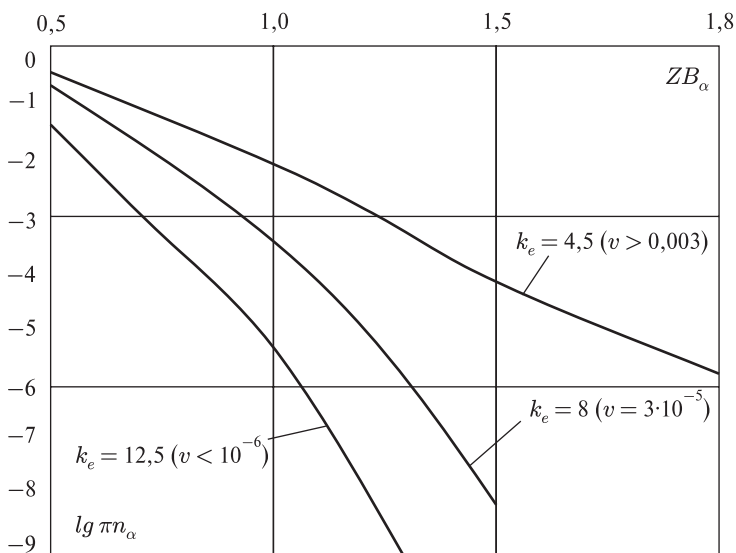


Рис. 3.10

Из сравнения полученных аппроксимаций возможностных мер, формулы (3.79), (3.85), следует, что они имеют инвариантный аргумент. Это позволяет объединить рассмотрение функций  $\pi l_\alpha$  и  $\pi n_\alpha$  на одной оси абсцисс  $\bar{z}b_\alpha$  и выявить области их практического применения.

Как следует из анализа рис. 3.8, 3.10, применение формулы (3.85) позволяет найти решение вариантов (2, 3) задачи, указанных в зависимости (3.78). Причем с практической точки зрения достаточно рассмотреть следующие области изменения аргументов:  $\alpha \in [10^{-5}, 10^{-1}]$ ,  $zb \in [1, 2]$ .

Таким образом, для нахождения меры определенности в диапазоне  $[0, 0,02]$  необходимо выбирать нормальную зависимость возможностной меры, а на области  $zb_{\alpha} \geq 1$  необходимо учитывать как квантиль «недоверия»  $\nu$ , так и уровень  $\alpha$  различимости границ.

Дополнительно исследуем влияние уровня  $\alpha$  на потенциальную погрешность  $\Gamma_{\pi}$  в определении возможностной меры отказа. С учетом формулы (3.82), (3.85) представим  $\bar{z}b_w$  как требуемое значение запаса, а потенциальную погрешность  $\Gamma_{\pi}$  запишем в виде:

$$\Gamma_{\pi}(\alpha) = \pi n(\bar{z}b_w) - \pi n(\bar{z}b_{\alpha}) = \pi n(1) - \pi n(1 + \alpha). \quad (3.86)$$

С учетом аппроксимаций  $\pi n_{\alpha}$  с коэффициентом  $k_e = 4,5; 8$  из зависимости (3.86) можно получить следующие соотношения:

$$\Gamma_{\pi}(k_e = 4,5) \approx 0,1 \alpha; \quad \Gamma_{\pi}(k_e = 8) \approx 0,004 \alpha. \quad (3.87)$$

#### 3.7.4. Установление потенциальной погрешности определения ВМ

Применим зависимости (3.86), (3.87) для установления потенциальной погрешности в определении возможностной меры отказа при условии, что уровень различимости  $\alpha$  параметров воздействия и чувствительности не ниже 0,001. Для этого возьмем значения  $\alpha = 0,001; 0,01$  и учтем, что для  $k_e = 4,5$  и 8 соответствующие квантили «недоверия» равны  $\nu = 0,003$  и 0,00003. Результаты расчета потенциальной погрешности  $\Gamma_{\pi}$  сведем в табл. 3.1, из анализа которых сделаем следующие выводы:

1. Чтобы оценивать и различать меру отказа на уровне значений от 0,001 и выше достаточно различать границы нечетких параметров модели отказа на уровне 0,01 и выше.
2. Чтобы оценивать и различать меру отказа на уровне значений от 0,00001 и выше при уровне различимости границ нечетких параметров равно и выше 0,001, необходимо использовать их нормальную аппроксимацию, характеризуемую квантилем доверия не ниже 0,99997.



Таблица 3.1

Коэффициент, $k_e$	Квантиль недоверия, $\nu$	Уровень различимости, $\alpha$	Потенциальная погрешность $\Gamma_{\pi n}$
4,5	0,003	0,01/0,001	0,001/0,0001
8	0,00003	0,01/0,001	$4 \cdot 10^{-5}/4 \cdot 10^{-6}$

### 3.7.5. Примеры нахождения ВМ и достижимого уровня её различимости

Рассматривается уникальная система «нерегламентированные факторы — потенциально опасный объект», предпосылки к отказам в которой можно выразить в виде унифицированного критерия: «если воздействие любого фактора превысит заданную чувствительность объекта, то это приведет к несанкционированному срабатыванию или отказу объекта». Экспертами установлены границы области размытости нечеткого воздействия  $[\bar{s}_h, s_h^\alpha]$  и нечеткой чувствительности  $[r_l^\alpha, \bar{r}_l]$ , где  $s_h^\alpha, r_l^\alpha$  — «ничтожно» возможные (на уровне различимости  $\alpha$ ) значения параметров,

$s_h, r_l$  — соответственно верхняя и нижняя границы «абсолютно» возможных (с уверенностью, равной единице) значений параметров  $s$  и  $r$ . Пусть известно, что  $s_h = 10, s_h^\alpha = 20, r_l^\alpha = 15, r_l = 18$ .

*Пример № 1.* Требуется оценить асимптотическое значение меры определенности возникновения отказа, если априорной информации о характере размытости параметров нет.

*Решение примера № 1.* Поскольку априорной информации о характере размытости параметров  $s, r$  нет, то асимптотическое значение меры определенности возникновения отказа  $d$  следует определять по линейной аппроксимации возможностной меры, формула (3.79).

В результате получим:  $d = \pi l = 1 - \bar{z}b = 1 - 0,6154 = 0,3846$ .

*Пример № 2.* Решить пример № 1 при условии, что априорная размытость параметров  $s, r$  характеризуется как «нормальная».

*Решение примера № 2.* Асимптотическое значение меры определенности  $d$  с учетом дополнительной информации, приведенной в условии, определим по нормальной зависимости возможностной меры. Обращаясь к формуле (3.85) или к рис.3.10 и выбирая  $k_e = 4,5$ , которому соответствует квантиль «недоверия»  $\nu \geq 0,003$ , при  $\bar{z}b_\alpha = 0,6154$  получим:

$$d = \pi n = \exp(-k_e \bar{z}b_\alpha^2) = 0,1819 \quad (k_e = 4,5).$$

*Пример № 3.* Оценить значение приведенного запаса безопасности  $\bar{z}b_\alpha$  и уровень различимости  $\alpha$ , обеспечивающие для «нормально» размытых  $s, r$  различие и оценку величины возможностной меры отказа в диапазоне:

$$1) 0,003 \leq \pi n_\alpha \leq 1; \quad 2) 0,001 \leq \pi n_\alpha \leq 1.$$

*Решение примера № 3.* Воспользуемся результатами, приведенными в табл. 4.1.<sup>хл</sup> Из таблицы следует, что для решения задачи в обоих случаях достаточно достичь уровня различимости границ  $\alpha \leq 0,01$ . Однако в первом случае корректную оценку  $\pi n_\alpha$  достаточно провести с величиной квантиля «недоверия»  $\nu \leq 0,003$ . Тогда как для оценки  $\pi n_\alpha$  в диапазоне  $0,001 \leq \pi n_\alpha \leq 1$  необходимо уменьшать  $\nu$ . Поэтому для решения первого варианта задачи достаточно обусловить применение формулы (3.85) с коэффициентом  $k_e = 4,5$ , а для решения второго варианта задачи необходимо уточнение аппроксимации, например до  $k_e = 8$ .

Тогда с помощью формулы (3.85) получим:

$$\bar{z}b_{1(2)} = (0,222(0,125) \ln(1 / \pi n))^{0,5}. \text{ Откуда } \bar{z}b_1 = 1,1361; \quad \bar{z}b_2 = 0,9292.$$

Для выяснения физического смысла полученных результатов примера № 3 раскроем выражение  $\bar{z}b_\alpha = (\bar{r}_l - \bar{s}_h) / (\Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha)$ , из которого следует, что для выполнения решений  $\bar{z}b_{1(2)}$  необходимо, чтобы параметрический запас безопасности  $(\bar{r}_l - \bar{s}_h)$  превышал в 1,1361 (0,9292) раза сумму длин интервалов размытости воздействия и чувствительности, различаемых на уровне  $\alpha = 0,01$ .

Таким образом, нахождение асимптотического значения меры возникновения отказа в уникальной системе достижимо на основе построения модели вида «нечеткое воздействие — нечеткая чувствительность» и установления границ размытости параметров этой модели. При этом асимптотическое значение меры отказа можно определить по формулам возможностной меры (3.79), (3.85), которые представляют собой функции от инвариантного аргумента, выраженного в виде отношения области пересечения носителей к сумме длин областей размытости, взятых по  $\alpha$ -срезу нечетких параметров модели отказа.

Чтобы оценивать и различать меру отказа на уровне значений от 0,001 и выше достаточно различать границы нечетких параметров модели отказа на уровне 0,01 и выше. Чтобы оценивать и различать меру отказа на уровне значений от 0,00001 и выше, при уровне различимости границ нечетких параметров равно и выше 0,001, необходимо использовать нормальную аппроксимацию нечетких параметров модели, характеризуемую квантилем доверия не ниже 0,99997 (коэффициентом их размытости  $k \geq 4$ ).

### 3.8. Вывод зависимости интегрального риска в рамках нечеткого множественно-параметрического базиса

Для определения зависимости интегрального риска докажем следующую теорему.

*Теорема.* Интегральный риск потенциально опасной системы есть произведение возможностной меры возникновения самого нежелательного исхода в системе на ущерб от его возникновения.

*Доказательство.* По определению [60, 61] интегральный риск:

$$R_U = \sum_j \sum_i P_{ji} (\sum_h U_{hji}), \quad (3.88)$$

где  $j \in J$  — множество происшествий, происходящих (способных произойти) за жизненный цикл (ЖЦ) потенциально опасного объекта,

$i \in I$  — множество этапов ЖЦ,

$h \in H$  — множество видов ущерба от  $(i, j)$  вида происшествия,

$p, u^{xli}$  — вероятность и ущерб от  $(i, j)$  вида происшествия.

Применяя к зависимости (3.88) правило гомоморфного перехода от алгебры множеств к алгебре нечетких мер, а также учитывая соотношения для мер определенности возникновения происшествия  $cr$  [11, 42]

$$\pi(cr) \geq p(cr), \quad (3.89)$$

получим, что:

$$\{R_U(\Pi, U)\} = \{\max_{j \in J} \max_{i \in I} \pi_{ij} (\max_{h \in H} u_{ijh})\}. \quad (3.90)$$

Известно, что самым нежелательным исходом  $Cr$  называется происшествие (авария, катастрофа), приводящая (способная привести) к максимальному ущербу. Тогда из этого определения и зависимости (3.90) следует:

$$(Ru(\Pi, U)) = \pi(Cr) * U(Cr) \text{ для } \forall j, i, h. \quad (3.91)$$

Применяя к зависимости (3.91) соотношение (3.89), получим:

$$R_U = (R_U(P, U)) \leq \pi(Cr) * U(Cr). \quad (3.92)$$

Что и требовалось доказать.

### 3.9. Формулировка проблемы в рамках нечеткого факторного параметрического базиса системы

С учетом полученных в разделе 3 результатов уточним формулировку проблемы, зависимость (2.38), и представим её в виде:

$$\begin{aligned} \text{Det}(\xi \rightarrow Cr) &= \text{Pos}(\xi \rightarrow Cr) = \text{Pos}(\exists B_{kk} \neq \emptyset \wedge Q_{kk}(Y, E, X) \neq \emptyset) = \\ &= \text{Pos}(Q_{kk}(Y_{\bar{k}k}, E, X)) = {}_{FS}Q_{kk}(I\bar{I}) \mid T_{!!}(M_i) \neq \emptyset; M_i \neq \emptyset, \end{aligned} \quad (3.93)$$

$$\text{где } \text{Pos}(B_{kk} \neq \emptyset) = \Pi_{kk} = (\pi_{m \mid l \mid k = kk}); \quad \text{Pos}(B \neq \emptyset) = \Pi; {}_{FS}Q \Leftarrow Q. \quad (3.94)$$

### 3.10. Выводы по разделу 3

1. На основании установления гомоморфизма нечеткого параметрического и булевого базисов системы обоснованы и впервые описаны правила перехода от логической к нечетко-параметрической форме функции связности, полученной в разделе 2. При этом *возможностная мера* реализации функций опасности может быть установлена как нечеткая функция от нечетких мер пересечения носителей размытых параметров воздействий и восприимчивости.
2. На примере отказов элементов разработаны новые методы установления возможностной меры реализации параметрических предпосылок опасности в системе. Впервые получено, что в модели «нечеткий параметр воздействия — нечеткий параметр восприимчивости» при линейной и гауссовой аппроксимациях функций принадлежности *возможностная мера* отказа элемента есть *отношение* уклонения ядер к суммарной размытости носителей параметров воздействия и восприимчивости.
3. В интересах решения актуальных задач обоснования и обеспечения достижения безопасности в сложных технических системах на уровне  $10^{-6}$  установлена новая зависимость возможностной меры как функции от характеристик размытости и уровней среза нечетких параметров множественно-параметрического базиса. Установлено, что для оценки и различения возможностной меры отказа элемента на уровне значений от 0,001 и выше достаточно различать границы нечетких параметров модели отказа на уровне 0,01 и выше. Чтобы оценивать и различать меру отказа на уровне значений от 0,00001 и выше при уровне различимости границ нечетких параметров равно и выше 0,001, необходимо использовать их гауссову аппроксимацию, характеризуемую квантилем доверия не ниже 0,9997.

*Шеленберг:* Вы имеете в виду возможность провала операции?

*Гиммлер:* Я имею в виду весь комплекс возможного.

*Юлиан Семенов.  
Семнадцать мгновений весны*

## РАЗДЕЛ 4

---

### **Аналитико-алгоритмические методы и информационно-расчетные средства для возможностной оценки риска сложных систем**

#### **4.1. Основные этапы решения проблемы оценки риска в условиях нечеткой информации о системе**

Основными этапами, выявленными для успешного решения проблемы оценки риска сложной системы, являются следующие:

- 1) представление решения проблемы (операций, алгоритмов и подготовки исходных данных) как дедуктивной порождающей системы, состоящей из [55]:
  - а) алгоритма распознавания класса системы и б) вычислительных алгоритмов;
- 2) построение вычислительных алгоритмов:
  - а) определения номеров потенциально опасных элементов — источников и приемников возможных факторов, действующих (способных действовать) в системе;
  - б) распознавание и выявление предпосылок опасности в системе, а также идентификации её классов безопасности;

- в) расчет показателей идентифицированного класса системы;
- 3) пошаговое согласование и установление взаимосвязанности алгоритмов распознавания и вычислений;
- 4) применение описанных выше (см. разделы 1, 3) принципов представления и использования исходных данных о системе:
  - а) ранжирования по общности; б) накопления причин и предпосылок;
- в) конъюнкции результатов.

По принципам представления и обработки исходных данных и организации вычислений можно выделить следующие способы получения показателей риска.

Способ 1. Определение показателей риска на «суженных» множествах ФПБ с использованием видовых факторных и параметрических критериев, п. 1.3.

Способ 2. Применение алгоритма «послойного» расчета массива дифференциальных ВМ с учетом необходимости привлечения дополнительных исходных данных об источниках, каналах и приемниках воздействий (например, данных о надежности, стоимости и продолжительности).

Способ 3. Прямой расчет показателей риска по найденным (заданным) функциям связности элементов решетки (гиперкуба) ФПБ.

По режимам ввода и обработки данных можно выделить «ручной» (с преобладающим участием оператора), автоматизированный (программно-ручной) и автоматический (программный) режимы работы.

Необходимо отметить, что для повышения эффективности расчетов и снижения затрат при оценке риска конкретной системы может быть применена комбинация вышеперечисленных способов обработки и режимов работы.

## 4.2. Общий алгоритм установления показателей риска

1. Относительно комплекса  $Cr$  критических происшествий в «осях размерности» опорного ФПБ системы СТС1 выявление и описание возможных предпосылок, источников и приемников опасности.
2. Построение подмножеств (1.14) и (1.15) и «сужение» множества предпосылок на основе логического критерия  $OB^{Cr} \neq \emptyset$ .
3. Построение структурной схемы факторных связей источников и приемников.
4. Уточнение параметрических критериев восприимчивости ПОЭ и инициирования ими вторичных факторов и определение функции

связности предпосылок рассматриваемой системы в параметрической и булевой формах.

5. По нечетким значениям отображенных элементов множества пересечения  $\mathbf{B}$ , формулы (1.23), (1.24), расчет множества  $\Pi(\mathbf{B}, \mathbf{Cr})$  возможных мер реализации элементарных предпосылок, (3.79), (3.85).
6. Преобразование функции связности (п. 4) в нечеткую форму, подстановка в неё результатов п. 5 и расчет возможностной меры возникновения исхода  $\mathbf{Cr}$ .
7. По значению ожидаемого ущерба от исхода  $\mathbf{Cr}$  нахождение асимптотического значения интегрального риска системы.

При этом используется полученное в п. 3.7 соотношение (3.92):

$$\mathbf{R}_U = \{\mathbf{R}_U(\Pi, \mathbf{U})\} \leq \pi(\mathbf{Cr}) \times \mathbf{U}(\mathbf{Cr}), \quad (4.1)$$

$$\text{где } \{\mathbf{R}_U(\Pi, \mathbf{U})\} = \{\pi_{ijk}^{Cr} \times \mathbf{U}_{ijk}^{Cr}\} \text{ для } \forall j, i, h, \mathbf{Cr}, \quad (4.2)$$

причем  $j \in \mathbf{I}, j \in \mathbf{J}, h \in \mathbf{H}, \mathbf{Cr} \in \mathbf{Cr}$ , см. зависимость (3.88).

На основе первого и третьего способов получения показателей риска, п. 4.1, детально раскроем этапы 5 и 6 общего алгоритма.

1. Анализируются множества  $\mathbf{M}_1, \mathbf{T}_1, \mathbf{L}_1, \mathbf{K}_1$  опорного базиса исследуемой системы и по критериям (1.23), (1.24) выявляются подмножества  $\mathbf{M}_{!!}, \mathbf{T}_{!!!}, \mathbf{L}_{**}, \mathbf{K}_{**}$ , характеризующие непустые узлы решетки множества-пересечения  $\mathbf{B}_1$ .
2. Для выявленных «опасных» элементов множеств (1.19) экспертным путем по уровню  $\alpha$ -среза устанавливают множества границ размытости носителей источников и приемников воздействий:

$$\mathbf{S}_{\alpha} = ((\bar{s}_h, s_h^{\alpha})_{m \mid t \mid k}), \mathbf{R}_{\alpha} = ((r_i^{\alpha}, \bar{r}_i)_{m \mid t \mid k}) \mid m \in \mathbf{M}_{!!}, t \in \mathbf{T}_{!!!}, l \in \mathbf{L}_{**}, k \in \mathbf{K}_{**}. \quad (4.3)$$

3. Нечеткая функция связности определяется в виде:

$$\text{Pos}(\mathbf{y}_{kk}(\mathbf{M}_{!!}, \mathbf{T}_{!!!}, \mathbf{L}_{**}, \mathbf{K}_{**}) = 1) = \quad (4.4)$$

$$= \max \max_{\mathbf{M}_{Bu}} (\max(\pi(bu_j), \min(\text{pos}(\mathbf{M}_{!!} \neq \emptyset), \text{pos}(\mathbf{T}_{!!!} \neq \emptyset), \text{pos}(\mathbf{L}_{**} \neq \emptyset), \text{pos}(\mathbf{K}_{**} \neq \emptyset)))) t \in \mathbf{T}_{!!!}, m \in \mathbf{M}_{!!}, j = 1,$$

где, например,  $\text{pos}(\mathbf{M}_{!!} \neq \emptyset)$  — есть формальное условие выбора элементов множества  $\mathbf{M}_{!!}$ .

4. На основе установленной структуры системы, например, имеющей следующий вид (рис. 4.1), ВМ инициирования критического ПОЭ,  $kK = 4$ :

$$\text{Pos } (y_{kk} = 4 = 1) = \max_{t \in \mathbf{T}_{!!!}} \max_{m \in \mathbf{M}_{!!!}} \max_{j=1}^{M_{Bu}} (\pi(bu_j), \min(\text{pos } (\mathbf{M}_{!!!} \neq \emptyset), \text{pos } (\mathbf{T}_{!!!} \neq \emptyset))) \quad (4.5)$$

5. Возможностные меры реализации элементарных цепочек связей ПОЭ, представленных элементами упорядоченного булеана, устанавливаются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \pi(bu_j) &= \pi_{m_l}^{\alpha} (0 - j - kK) \mid j = (1, M_{Bu} = 8) \Rightarrow \\ \Rightarrow \pi(bu_1 = 04) &= \pi^{\alpha} (z b_{\alpha} ((s_h, s_h^{\alpha})_{m_l 04}), (r_l^{\alpha}, \bar{r}_l)_{m_l 4}) = \pi^{\alpha} (0, 4); \\ \pi(bu_2 = 014) &= \min(\pi^{\alpha} (0, 1), \pi^{\alpha} (1, 4)); \\ \pi(bu_3 = 024) &= \min(\pi^{\alpha} (0, 2), \pi^{\alpha} (2, 4)); \\ &\dots\dots\dots \\ \pi(bu_8 = 01234) &= \min(\pi^{\alpha} (0, 1), \pi^{\alpha} (1, 2), \pi^{\alpha} (2, 3), \pi^{\alpha} (3, 4)). \end{aligned} \quad (4.6)$$

6. Элементарные ВМ  $\pi^{\alpha}(\dots)$  в формулах (4.6) определяются на основании зависимостей (3.79), (3.85).

Для реализации вышеперечисленных способов обработки и вычислений показателей риска в трех режимах работы (п. 4.1) были разработаны программные комплексы, условно названные MART 1.1 и «Возмер».

### 4.3. Программа «Возмер» для расчёта возможностной меры риска сложных систем

Программа «Возмер» спроектирована как составная часть программного комплекса моделирования и оценки риска MART 1.1 (Modeling and Analysis of Risk in Technical systems) и предназначена для расчёта возможностной меры риска в сложных системах по данным экспертизы и текущего мониторинга.

В программе реализованы следующие функции:

- 1) послыйный алгоритм расчета массива дифференцированных возможностных мер (ВМ);
- 2) преобразование булевой функции ориентированной связности источников, приемников, вторичных источников и критических приемников в возможностную форму;
- 3) расчет и вывод максимальных значений ВМ ориентированно связанных предпосылок происшествий;
- 4) расчет интегрального риска многофакторной системы по заданным комплексной (многофакторной) связности источников и предпосылок



критического происшествия и нормированном ущербе от их возникновения.

Структурно программа «Возмер» состоит из:

1. Модуля ввода и обработки исходных данных.
2. Модуля преобразования булевого вида функции связности в возможностную форму.
3. Расчетно-аналитического модуля.
4. Базы данных с результатами вычислений предыдущих моделей.
5. Модуля представления данных.

Внешний вид формы ввода исходных данных и элементов представления результатов программного пакета «Возмер» представлен на рис. 4.1.

**СИСТЕМА ОЦЕНКИ "ВОЗМЕР" 2.2 (TRIAL)**  
Файл    Исходные данные    Помощь

**V (воздействие)**

L	10	9	8	5	
---	----	---	---	---	--

DV (абс.погрешность воздействия)

L	2	1	1	0.5	
---	---	---	---	-----	--

**R (восприимчивость)**

L	12	6	4	2	
---	----	---	---	---	--

DR (абс.погрешность восприимчивости)

L	1	1	1	1	
---	---	---	---	---	--

**k F (ослабление)**

f	1	0.5	0.3	0.1	
		0.4	0.3	0.2	
			0.2	0.1	
				0.1	

**k DF (абс.погрешность ослабления)**

f	0.1	0.1	0.1	0.1	
		0.1	0.1	0.1	
			0.1	0.1	
				0.1	

**Результаты вычислений**

K=0    MaxPL = 0.895939260972385

$t = 0$

$\pi_L =$

L=0	0,381966011250	1	1	1	1
	0,585786437626	0	1	1	1
	0,538360058419	0,332882874656	0	1	1
	0,504902432036	0,895939260972	0,335631227988	0,001659761316	1
	1	1	1	1	1

K=0    MaxPN = 0.952439331158743

$t = 0$

$\pi_N =$

L=0	0,179272721176	0	0	0	0
	0,462061954478	0,001389152188	0	0	0
	0,383275410604	0,134969876137	0,000415696385	0	0
	0,331858300094	0,952439331158	0,137210862578	0,011276046918	0
	0	0	0	0	0

**Выражение функции связности - Z =**

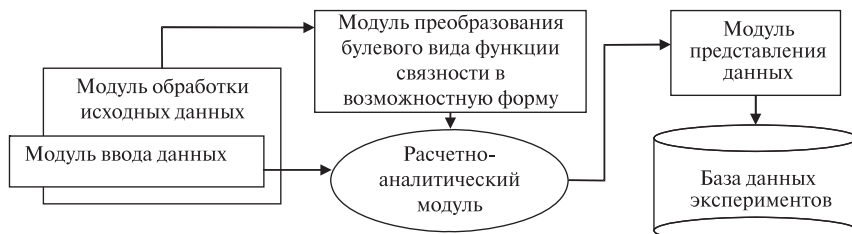
$x00vx10vx21^{\wedge}x32$

**POSSIBILITY(z) = 0.134969876137067**

Выход

Рис. 4.1. Внешний вид формы ввода исходных данных и элементов представления результатов программного пакета «Возмер»

Структурная схема программного пакета «Возмер» представлена на рис. 4.2.



**Рис. 4.2. Структурная схема взаимосвязи программных модулей**

#### **4.4. Диалоговая обучающая подсистема ввода исходных данных и расчета дифференциальных и интегральных возможностных мер**

Диалоговая обучающая подсистема ввода исходных данных и расчета дифференциальных и интегральных возможностных мер (расчета возможностных как значений элементарных предпосылок, так и значений возможностных мер функций связности  $\text{Pos}(z)$ ) реализована на основе программного пакета «Возмер» и включает в себя следующие этапы:

1. Руководствуясь принципом позиционного соответствия номеров источников ( $l$ ) и приемников ( $k$ ) воздействий, а также номеров ( $t$ ) воздействующих факторов в массивах  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{DV}$ ,  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{DR}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{DF}$ , оператор либо вручную вводит подготовленные заранее значения массивов  $\{\mathbf{V}, \mathbf{DV}, \mathbf{R}, \mathbf{DR}, \mathbf{F}, \mathbf{DF}\}_1$  исходных данных в соответствующие поля векторов и матриц, либо загружает такие данные из файла путем выбора подменю «Загрузить исходные данные» в меню «Файл» (см. рис. 4.1, левые массивы данных).
2. Выбором соответствующего подменю оператор производит запуск программы расчета и визуализации значений массивов  $\Pi_L$ ,  $\Pi_N$  (см. два правых верхних массива рис. 4.1).
3. На основе результатов вычислений, руководствуясь принципом позиционного соответствия номеров источников ( $l$ ) и приемников ( $k$ ) воздействий, а также номеров ( $t$ ) воздействующих факторов в массивах  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{R}$ ,  $\Pi_L$ ,  $\Pi_N$ , оператор формирует вид передаточной функции анализируемой системы. В приведенном примере это цепочка:  $l = 1 - k = 4 \rightarrow \pi_{t=1/k}^N = 0,952439\dots$
4. Анализируется связность элементов, вводится булева форма функции связности  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Ввод и контроль ввода передаточной функции осуществляется в соответствующем интерфейсном элементе в стандартном формате комбинаторных выражений.

5. Производится преобразование булевой формы в возможность форму и расчет значения функции связности  $\text{Pos} (z = 1)$ .

Результаты расчета сохраняются как элементарный фрагмент (кадр) расчета. Поскольку число «слоев»  $t$  не ограничено, то такая «покадровая» обработка и накопление данных позволяют накапливать фрагменты «гиперкуба»:  $\{T, L, K, \text{POS}\} = \{(\text{Pos}_1, t = 0, l = 0 \dots 4, k = 1 \dots 5); (\text{Pos}_2, t = 0, l = 5 \dots 9, k = 6 \dots 10); (\text{Pos}_3, t = 1, l = 0 \dots 4, k = 1 \dots 5); \dots\}$ .

#### 4.5. Требования к формализации, подготовке и сбору исходных данных о конкретной системе

Реализация методики возможностной (нечеткой) оценки безопасности сложных систем представляет собой взаимосвязанный процесс <sup>xliii</sup> по сбору, формализации разнородной информации об объекте, анализа вида и характеристик факторов внешней среды, характеристик восприимчивости потенциально опасных объектов исследуемой системы, определения возможностной меры возникновения аварии (происшествия) на объекте и включает в себя следующие основные этапы:

##### 1. Предварительный.


- 1.1. Формирование перечня потенциально опасных объектов исследуемой системы на основании существующей номенклатуры безопасности и ГОСТ<sup>xliv</sup>
- 1.2. Определение взаиморасположения объектов.
- 1.3. Определение способов и видов взаимного влияния между объектами.
- 1.4. Формирование перечня значимых видов факторов внешней среды.

##### 2. Основной.

- 2.1. Формирование структуры факторных связей потенциально опасных объектов системы.
- 2.2. Формирование упорядоченного булеана предпосылок возникновения события (происшествия) для каждого из потенциально опасных объектов и вида факторов.

##### 3. Расчётный.

- 3.1. Нормализация значений характеристик видов воздействий и восприимчивости.
- 3.2. Определение возможностной меры происшествия для каждого потенциально опасного объекта.

- 3.3. Определение вида функции связности происшествий на потенциально опасных объектах и показателя риска <sup>xlv</sup> системы
- 3.4. Определение значения риска при различных вариантах  подхода (причинно-следственной цепи происшествия) в системе.

#### 4. Итоговый.

- 4.1. Формирование экспертного заключения о безопасности и оценке риска для исследуемой сложной системы.
- 4.2. Выработка организационно-технических рекомендаций должностным лицам организации, ответственным за эксплуатацию технических систем.
- 4.3. Выработка рекомендаций руководителю организации (отделу эксплуатации) по повышению безопасности эксплуатации объектов и системы в целом.

В силу значительного объема и сложности вычислительно-расчётных процедур для оперативного применения методики целесообразно использование экспертной группой специализированных расчётно-аналитических программ на этапах 2–3 методики.

Использование программных средств на этапе формирования рекомендаций возможно лишь при наличии набора готовых решений.

Одним из перспективных направлений автоматизации процесса расчёта значений безопасности сложных систем является создание технологии и информационно-методического обеспечения динамического прогнозирования риска в системе по данным текущего мониторинга.

В качестве требований к исходным данным на предварительном этапе устанавливаются следующие необходимые условия:

1. Наличие паспорта безопасности объекта.
2. Известно точное количество объектов в структуре рассматриваемой системы.
3. Известны параметры (конструктивно-технические и массогабаритные характеристики) каждого из объектов.


Для получения необходимых данных о системе при реализации методики используются методы экспертного оценивания, причем допустимо применение как структурированных, так и неструктурированных экспертиз. Поскольку информация, получаемая в результате проведения экспертиз обоих типов, субъективна, то целесообразно перед их проведением оценить компетентность и представительность экспертов, а в ходе экспертиз определять согласованность мнений экспертов на основе расчета коэффициента конкордации Кендалла [10].

#### 4.6. Алгоритм и программа визуализации моделирования объектов и их связей

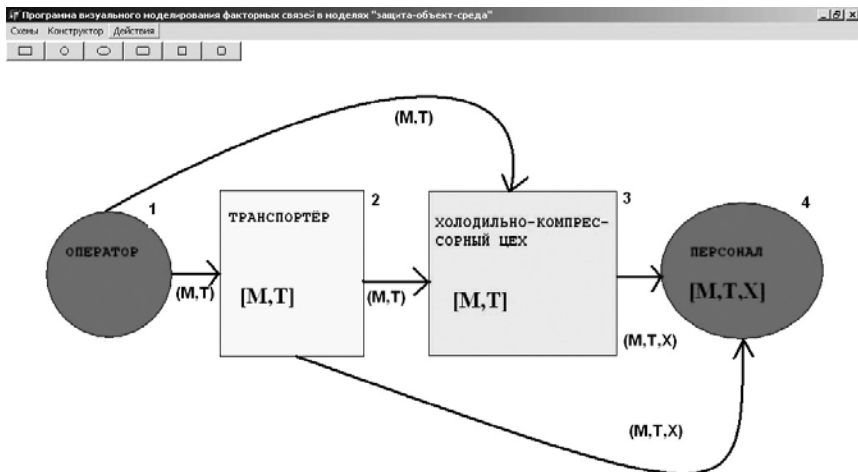
С целью сокращения времени, затрачиваемого экспертной группой на формирование структуры факторных связей исследуемой системы, разработан программный алгоритм моделирования факторных связей потенциально опасных объектов «защита — объект — среда», который реализован в виде отдельного программного модуля в составе комплекса моделирования и оценки риска MART 1.1 (Modeling and Analysis of Risk in Technical systems) на примере анализа безопасности производственного предприятия с аварийными химически опасными веществами (АХОВ).

Программа предназначена для формирования структурно-логических схем связи первичных и вторичных воздействий видов факторов источников и восприимчивости к видам воздействий приемников потенциально опасных объектов системы.

Применение объектно-ориентированного подхода к организации визуального моделирования обеспечивает наглядность и доступность для восприятия схем «воздействия — восприимчивость», с одной стороны<sup>xlvi</sup>, и необходимую автоматизацию рутинного процесса построения упорядоченного булеана связей «воздействующий фактор — потенциально опасный объект» и его формальное представление.

Особенностью программной реализации  ритма является возможность динамического изменения параметров схемы (количество объектов, количество связей объектов, вид факторных связей) и возможность дополнения ранее разработанных схем новыми элементами.

Пример моделирования схемы факторных связей объектов «Операторы-водители транспортёров» — «Транспортеры» — «Холодильно-компрессорный цех» — «Персонал предприятия» представлен на рис. 4.3.



**Рис. 4.3. Пример моделирования факторных связей потенциально опасных объектов производственного предприятия с АХОВ**

**Выводы.**<sup>xlvii</sup> Таким образом, разработаны аналитико-алгоритмический метод и информационно-расчетные средства для факторного параметрического моделирования и возможностной оценки риска сложных систем. Созданы программа «Возмер» для расчёта возможностной меры риска сложных систем и диалоговая обучающая подсистема ввода исходных данных и расчета дифференциальных и интегральных возможностей мер. Разработаны и апробированы основные требования к формализации, подготовке и сбору исходных данных о конкретной системе. Большое внимание уделено созданию алгоритма и программы визуализации моделирования объектов и их связей.

Взрослые очень любят цифры... Когда говоришь взрослым: «Я видел красивый дом из розового кирпича, в окнах у него герань, а на крыше голуби», — они никак не могут представить себе этот дом. Им надо сказать: «Я видел дом за сто тысяч франков», — и тогда они восклицают: «Какая красота!».

*Антуан де Сент-Экзюпери*

## РАЗДЕЛ 5

---

### **Примеры апробации методологии мониторинга и возможностной оценки показателей сложных систем**

В данном разделе приводятся результаты работ [75–80, 86], выполненных на основе разработанной методологии факторного параметрического моделирования и возможностной (нечеткой) оценки риска сложных систем.

## 5.1. Факторный параметрический анализ и оценка риска системы «предприятие с аварийными химически опасными веществами — нерегламентированные факторы — средства и мероприятия защиты»

На основе рассмотренной в разделах 1–3 концепции факторного параметрического моделирования и возможности оценки риска проведем решение задачи оценки риска и собственной безопасности системы «предприятие с аварийными химически опасными веществами (АХОВ) — нерегламентированные факторы — средства и мероприятия защиты». При этом подробное, «пошаговое» изложение хода решения преследует цель как более детального раскрытия неочевидного этапа инженерной, конструкторской и экономической экспертизы системы для более полного и достоверного получения исходных данных, так и обучения специалистов по риск-менеджменту.

Примем следующее ограничение. Внешние, по отношению к рассматриваемой системе, воздействия  $V^e$  здесь не рассматриваются, а проводится анализ только вторичных (собственных)  $V^i$  аварийных воздействий ПОЭ объекта и нерегламентированных действий операторов.

### 5.1.1. Этап инженерной экспертизы безопасности системы и подготовка исходных данных

В результате инженерного анализа получены следующие исходные данные по предприятию с аварийными химически опасными веществами (табл. 5.1–5.8).

Таблица 5.1

Обслуживающий персонал, восприимчивость к действию факторов, множество  $R_{1(4)}$

Вид фактора	Параметр 1	Параметр 2	Исход поражения, травмирования	Источник (документ)
Механическая	Изб. давл. во фр. УВ $\Delta P_{\text{ф}}$ , МПа	Импульс сжат. $\tau_{+}$ , с		
	0,1...0,4	1	Летальный исход (ЛИ)	[74], ч. 5, с. 287
	0,01...0,02	1	Баротравма	
Т. Тепловая радиация	Плотность мощности, Вт/м <sup>2</sup>	Длительность, с	Ожог кожи	[73], ч. 2, 178



	$(1...3) \cdot 10^6$	1...2	1 степень (ожог, 0,12 мм кожи)	
	$(1...2) \cdot 10^7$	1...2	3 степень (ожог, 2 мм кожи)	
Э. Электрический ток	Величина тока, миллиампер, мА	Длительность, с	Электрический удар	ПУЭ-2002
	10...20	1...3	2 степень	
	80...100	1...2	4 степень	
Х. Аварийные химически опасные вещества, $\text{NH}_3$	Концентрация в зоне воздействия, $\text{мг/м}^3$	Длительность, с	Отравление	[73], ч. 3. с. 134 Методика ОНД-86
	100...230	1...5	удушие	
	400...600	1...2	потеря сознания	

Таблица 5.2

## Обслуживающий персонал (воздействие)

Механический фактор, $t = 1$	Удары, поломки, механические повреждения
Тепловой, $t = 2$	Инициирование искры, пламени
Химический, $t = 3$	Нерегламентированные действия с АХОВ, неиспользование СИЗ

Таблица 5.3

Транспортер. ПОЭ — газовый баллон с пропан-бутановой смесью технической (СПБТ), объем 50 л. Восприимчивость к горению и взрыву, множество  $R_2$

Вид фактора	Параметр 1	Параметр 2	Параметр 3	Источник
Механический	Удар, ускорение $\sigma_{\text{кр}} = 10^7 \dots 10^8 \text{ Па}$	Длительность, 0,1–1,0 с		[74]
Тепловой	Температура воспламенения, °C	Критическое давление, МПа	Критическая плотность, $\text{кг/м}^3$	[73], часть 2, с. 187
	100...150	4...4,6	220...250	
	Стехиометрический состав смеси	Масса 14...21 кг	$T_{\text{ини}} = 40 \dots 50^\circ \text{C}$ $\rho_{\text{стех.}} = 1,31 \dots 1,4$	

Таблица 5.4

Транспортер. Способность баллона с СПБТ остаточным объемом 20 л к созданию аварийных факторов (вторичных воздействий), множество  $V_2^i$

Тепловой фактор / Диффузия (ослабление в воздухе)				
Теплота сгорания, Q, МДж/кг	Интегральная теплота, МДж	Температура горения, T, °C	Тепловой поток, q, МДж/м <sup>2</sup>	Источник
3,4... 4,3	68... 86	2600... 2900	1 м — 5,44; 2 м — 1,34; 4 м — 0,34; 6 м — 0,1	[73] с. 252
Механический фактор / Ослабление в воздухе				
Ударная волна, МПа	Длительность, с	Скорость оск., м/с	Энергия оск., Дж	[73, 74]
1 м — 4; 2 м — 1; 4 <sup>хlix</sup> 0,25	0,05 ... 0,6	24... 250	1... 70	

Таблица 5.5

Холодильно-компрессорный цех. Восприимчивость ПОЭ к созданию аварийных ситуаций (повреждений, травлению газа, разрывов цистерн) — множество  $R_3$

Параметр 1	Параметр 2	Вид повреждения	Источник
Механический фактор			
Изб. давл. $\Delta P_{\phi}$ , МПа	Импульс сжат. $\tau_+$ , с	Разрыв цистерны, трубопровода	[73]
0,3 ... 0,5	1,5 ... 3		
Тепловой фактор			
Плотность мощности теплового излучения, Вт/м <sup>2</sup>	Длительность, с	Нагрев... тепловой взрыв	Источник [74]
$10^6 ... 10^7$	5 ... 20		

Таблица 5.6

Холодильно-компрессорный цех. Способность ПОЭ с аммиаком к созданию аварийных факторов (вторичных воздействий)  $V_3^i$  [73, 74]

<b>Механический фактор: травление, разлет осколков, взрыв</b>
---

Относительная концентрация к объему воздуха в зоне аварии, %	Абсолютная концентрация $\text{NH}_3$ , мг/л	Изб. давл. $\Delta P_{\text{ф}}$ , МПа	Энергия взрыва, МДж
15 ... 28	107 ... 200	0,2 ... 1,5	$\approx 10 \dots 10^4$
<b>Тепловой фактор: горение</b>			
10 ...12	76 ...80	$q$ , МДж/м <sup>2</sup> 10 (1м); 8 (2м); 6 (4); 2(6)	Интегральная теплота, 10...600 МДж
<b>Химический фактор, отравление персонала</b>			
>7	130... 160 мг/м <sup>3</sup>		

Таблица 5.7

Функции ослабления  $F_{\text{лк}}$  и их погрешности представления  $\Delta F_{\text{лк}}$  для каналов прохождения отдельных параметров факторов от источника — до приемника (на основе источников [3, 32, 33, 35, 73, 74, 85])

$F_{\text{лк}}$ (источник/приемник)	транспортёр	ХКЦ	Персонал ХКЦ
Обслуживающий персонал транспорта	М 0,1 ... 1,0	0,01...0,1 $\Delta=0,1$	
	Т 0,1 ... 1,0	$(1...2) \cdot 10^{-6}$ $\Delta=10^{-8}$	
	Э		
	Х		
Транспортёр	М	$10^{-3} \dots 10^{-1}$ $\Delta=0,5$	0,001...0,5 $\Delta=0,1$
	Т	0,01...0,1 $\Delta=0,5$	0,01...0,5 $\Delta=0,5$
	Э		
	Х	0,01...0,1 $\Delta=0,5$	0,001...0,5 $\Delta=0,1$
ХКЦ	М		0,01...0,5 $\Delta=0,5$
	Т		0,01...0,5 $\Delta=0,5$
	Э		0,01...0,02 $\Delta=0,005$
	Х		0,1...0,5 $\Delta=0,5$

Таблица 5.8

Сводные данные по восприимчивости приемников ( $k$ )

(Источник/Приемник)	Транспортёр	ХКЦ	Персонал ХКЦ, ПК Балтика — Р-н-Д
---------------------	-------------	-----	--

Обслуживающий персонал транспорта	М 4...4,6; $\Delta=1$ (МПа)	0,5...1,5; $\delta=50$ (%)	0,1...0,3; $\delta=50$ (%)
	Т 0,2...0,05; 0,1 (МВт/м <sup>2</sup> )	1...10 (МВт/м <sup>2</sup> ); $\delta=50$ (%)	
	Э		
	Х		100...230; 400...600 (мг/м <sup>3</sup> ) $\delta=50$ (%)

### 5.1.2. Установление факторных параметрических критериев происхождения в системе

На основании анализа полученных данных и свойств рассматриваемой системы построим её собственный производный ФПБ. Для этого произведем выбор производных параметров факторов, используемых для дальнейшего анализа (табл. 5.9).

Таблица 5.9

Производные параметры  
факторного параметрического базиса системы

№	Вид фактора и его классификация	Вид параметров, $m$		
		$m=1$	$m=2$	$m=3$
1	Механический	Избыточное давление $\Delta P_{\text{ф}}$ , МПа,	Импульс сжатия $\tau_+$ , с	Энергия осколков $E$ , Дж
2	Тепловой	Плотность мощности, Вт/м <sup>2</sup>	Длительность, с	Температура, °С
3	Химический	Концентрация АХОВ, Мг/м <sup>3</sup>	Длительность, с	Класс опасности

На основании раздела 1 выпишем и дадим физическую трактовку основным элементам множеств ФПБ рассматриваемой системы:  $V^1 = (v_{ml})$ ;  $R = (r_{mlk})$ ;  $F = (f_{mlk})$ ;  $S = (s_{mlk})$ .

1. Элемент  $v_{ml}$  — нечеткий параметр  $m$  вида фактора  $t$ , созданного источником  $l$  вида.
2. Элемент  $r_{mlk}$  — нечеткий параметр  $m$  вида, описывающий восприимчивость  $k$  элемента к действию фактора  $t$  вида.
3. Элемент  $f_{mlk}$  — нечеткая функция ослабления ( $f \in [0,1]$ )  $m$  параметра фактора  $t$  вида, распространяющегося в объекте и (или) среде от  $l$  источника до  $k$  приемника.
4. Элемент  $s_{mlk}$  — нечеткий параметр  $m$  вида, выражающий действие фактора  $t$  вида источника  $l$ , который непосредственно, с учетом ос-

лабления, прикладывается к приемнику (ПОЭ или оператору) с номером  $k$ .

Причем отметим, что для получения параметра «непосредственного» воздействия на приемники применяется  $\times$  — операция алгебраического умножения:

$$s_{mlk} = f_{mlk} \times v_{ml}. \quad (5.1)$$

Физический смысл элементов ФПБ следующий. Например, транспортер, рассматриваемый как источник аварийных воздействий, пронумерован  $l = 2$ . При разрыве его баллона с ПБТС образуется механический ( $t = 1$ ), тепловой ( $t = 2$ ) и химический ( $t = 3$ ) факторы, описываемые принятыми производными параметрами, приведенными в табл. 5.9,  $\{m\} = \{1, 2, 3\}$ . С другой стороны, как приемник, транспортер,  $k = 2$ , восприимчив к действию механического  $t = 1$  и теплового  $t = 2$  факторов, также соответственно выражаемых производными параметрами табл. 5.9,  $\{m\} = \{1, 2, 3\}$ . При этом видно, что совокупности параметров  $\{m\}^{t=1}$  и  $\{m\}^{t=2}$  различаются.

Активный отказ (АО) в системе может быть инициирован оператором путем создания нерегламентированных действий в виде механического и теплового факторов.

Тогда параметрический критерий инициирования оператором АО в транспортере:

$$(s_{\{m\}112} \geq r_{\{m\}12}) \vee (s_{\{m\}212} \geq r_{\{m\}22}). \quad (5.2)$$

Параметрический критерий инициирования активных отказов в холодно-компрессорном цехе (ХКЦ)

$$(s_{\{m\}113} \geq r_{\{m\}13}) \vee (s_{\{m\}213} \geq r_{\{m\}23}) \vee (s_{\{m\}123} \geq r_{\{m\}13}) \vee (s_{\{m\}223} \geq r_{\{m\}23}), \quad (5.3)$$

где первые два логических условия выражают критерий АО при нерегламентированных действиях оператора, а вторые два условия — действия нерегламентированных факторов транспортера.

Параметрический критерий поражения персонала предприятия с АХОВ запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} & \text{А} \quad (s_{\{m\}124} \geq r_{\{m\}14}) \vee (s_{\{m\}134} \geq r_{\{m\}14}) \\ & \text{Б} \quad (s_{\{m\}224} \geq r_{\{m\}24}) \vee (s_{\{m\}234} \geq r_{\{m\}24}) \\ & \text{В} \quad (s_{\{m\}324} \geq r_{\{m\}34}) \vee (s_{\{m\}334} \geq r_{\{m\}34}). \end{aligned} \quad (5.4)$$

Группа А в условиях (5.4) выражает критерий механического поражения персонала (баротравма или поражение осколками); группа Б — тепловое поражение (ожоги кожи или дыхательных путей); группа В — химическое поражение персонала.

Попутно заметим, что если действия источников 2 и 3 происходят одновременно и (или) совместно, то выражение (5.4) можно упростить путем алгебраического суммирования однородных воздействий.

Например, в группе А это:

$$(s_{\{m\}124} + s_{\{m\}134}) \geq r_{\{m\}14}. \quad (5.5)$$

Таким образом, на основе результатов экспертного анализа системы «ПОЭ — нерегламентированные факторы — персонал» и построения собственного производного факторного параметрического базиса этой системы были обоснованы и установлены формализованные критерии нежелательных исходов, которые возникают (могут возникнуть) при нерегламентированных действиях операторов предприятия.

### 5.1.3. Преобразование параметрических критериев в булеву форму

Не детализируя пока виды параметров, опустим обозначения множества  $\{m\}$ , используемые в формулах (5.2)–(5.4).

Согласно правилам построения булевого базиса, разделы 1, 2 [40–42], критерии (5.2)–(5.4) запишем соответственно в виде:

$$y_2 = y_1 (x_{112} \vee x_{212}) = 1, \quad (5.6)$$

$$y_3 = y_1 (x_{113} \vee x_{213} \vee x_{123} \vee x_{223}) = 1, \quad (5.7)$$

$$y_4 = y_1 (x_{124} \vee x_{224} \vee x_{324} \vee x_{134} \vee x_{234} \vee x_{334}) = 1, \quad (5.8)$$

где  $y_1$  — функция индикации нерегламентированных действий оператора транспорта.

Условие  $y_2 = 1$  означает активный отказ (иницирование) транспорта, условие  $y_3 = 1$  — создание аварии в ХКЦ, а условие  $y_4 = 1$  выражает все виды поражения персонала.

Причем очевидно, и это видно из графической схемы (рис. 4.3), что поражение персонала ХКЦ от рассматриваемого набора факторов произойдет при условии логического произведения функций:

$$y_4 = y_1 \wedge y_2 \wedge y_3. \quad (5.9)$$

Очевидно, что, если  $y_1 = 0$  и не учитывать возможные действия факторов внешней среды (см. рис. 4.3), то:

$$y_2 = 0; y_3 = 0; y_4 = 0. \quad (5.10)$$

#### 5.1.4. Аналитическое выражение возможностных мер происшествий в системе

Согласно правилам перехода от булевой к нечеткой форме функции связности, раздел 3 [40–43], преобразуем формулу (5.8) и, приняв условие о том, что возможностная мера нерегламентированных действий операторов компании больше нуля, например  $\text{Pos}(y_1=1) = \xi$ , определим возможностную меру (ВМ) поражения персонала предприятия с АХОВ в следующем виде:

$$\text{Pos}(y_4=1) = \min(\max(\pi_{124}, \pi_{224}, \pi_{324}, \pi_{134}, \pi_{234}, \pi_{334}), \xi), \quad (5.11)$$

где, например:

- 1) ВМ механического поражения операторов от разрыва баллона транспорта и цистерны ХКЦ:

$$\pi_{14} = \min(\max(\text{Pos}(s_{124} \geq r_{14}), \text{Pos}(s_{134} \geq r_{14})), \xi); \quad (5.12)$$

- 2) ВМ химического отравления персонала предприятия с АХОВ:

$$\pi_{34} = \max(\pi_{324}, \pi_{334}) = \min(\max(\text{Pos}(s_{324} \geq r_{34}), \text{Pos}(s_{334} \geq r_{34})), \xi); \quad (5.13)$$

- 3) ВМ теплового поражения операторов:

$$\pi_{24} = \max(\pi_{224}, \pi_{234}) = \min(\max(\text{Pos}(s_{224} \geq r_{24}), \text{Pos}(s_{234} \geq r_{24})), \xi); \quad (5.14)$$

Строго говоря, формулы (5.10)–(5.14) справедливы для однопараметрических моделей и критериев происшествия. Применение комплексных многопараметрических критериев для описания и выявления происшествий и их предпосылок в системе достижимо, если найдены границы (области допустимых значений) комплексных показателей восприимчивости:

$$r^{(*)}_{\{m\}tk} = \{r^{(*)}_{m=1tk}, r^{(*)}_{m=2tk}, r^{(*)}_{m=3tk}\}. \quad (5.15)$$

Пример нахождения граничных значений комплексного показателя восприимчивости полуограниченного тела к тепловому воздействию приведен в п. 5.3.

#### 5.1.5. Расчет ВМ в однопараметрической модели предпосылок происшествий

Для описания возможностей применения как аналитического (явно-го), так и информационно-алгоритмического способов расчета показате-

лей риска рассматриваемой системы воспользуемся следующим фрагментом алгоритма программы «Возмер-2.2» [78, 85, 86].

1. Подготовка и (или) введение с клавиатуры значений ядер параметров базиса — значений массивов: **V**, **F**, **R** (см. рис. 4.1).
2. Предварительная обработка массивов базиса.  
Получение массива:

$$\mathbf{S} = \mathbf{F} * \mathbf{V} \rightarrow S_{TLK} = f_{ilk} * v_{il}, \quad (5.16)$$

здесь знак  $*$  — знак алгебраического умножения.

Получение массивов **OV**, **OF**, **OR**, **OS**, **OB** по правилу:

$$\begin{aligned} \mathbf{OV} &\rightarrow (ov_{il} = 1 \text{ if } v_{il} > 0); \mathbf{OF} \rightarrow (of_{ilk} = 1 \text{ if } f_{ilk} > 0); \\ \mathbf{OR} &\rightarrow (or_{ik} = 1 \text{ if } r_{ik} > 0); \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\mathbf{OS} \rightarrow (os_{ilk} = 1 \text{ if } s_{ilk} > 0); \mathbf{OB} \rightarrow (ob_{ilk} = or_{ik} \wedge os_{ilk}). \quad (5.18)$$

3. Обработка исходных данных по критериям классификации.

**1 шаг:** если  $\mathbf{V} = \emptyset$ , то присваивается класс безопасности 1,  $cl = 1$ , end, иначе

**2 шаг:** если  $\mathbf{OV} \cap \mathbf{OR} = \emptyset$ , то  $cl = 2$ , end, иначе

**3 шаг:** если  $\mathbf{OB} = \emptyset$ , то  $cl = 3$ , end, иначе

**4 шаг:** ( $\mathbf{OB} \neq \emptyset$ ): Производится запрос о введении дополнительных данных в виде значений массивов  $\mathbf{DV}=(dv_{il})$ ,  $\mathbf{DF}=(df_{ilk})$ ,  $\mathbf{DR}=(dr_{ik})$ .

*Замечание.* Необходимость п. 2, 3 очевидна. Если результаты экспертизы СТС **получены**<sup>ii</sup> в форме, предложенной нами и рассматриваемой здесь, «пошагово» **обсуждать** по критериям, п. 3, и доказать, что СТС безопасна с классом безопасности  $cl \leq 3$ , то дальнейший анализ риска системы можно не проводить.

4. Введение с клавиатуры значений массивов: **DV**, **DF**, **DR**.

5. Обработка массивов базиса **S**, **R** с учетом **DV**, **DF**, **DR** и получение значений массива **DS** по формуле:

$$\mathbf{DS} = (ds_{ilk}) \rightarrow ds_{ilk} = s_{ilk} * ((dv_{il} / v_{il})^2 + (df_{ilk} / f_{ilk})^2)^{0.5}. \quad (5.19)$$

6. Расчет значений массива **B** по формуле:

$$B = (b_{ilk}) \rightarrow b_{ilk} = s_{ilk} + ds_{ilk} - r_{ik} + dr_{ik}. \quad (5.20)$$

Расчет значений массива **ZB**:

$$\mathbf{ZB} = (zb_{ilk}) \rightarrow zb_{ilk} = r_{ik} - s_{ilk}. \quad (5.21)$$



Расчет значений массива **DSUM**:

$$DSUM = (dsum_{ilk}) \rightarrow dsum_{ilk} = dr_{ik} + ds_{ilk} . \quad (5.22)$$

7. Продолжение обработки исходных данных по критериям классификации:

**5 шаг:** если  $\mathbf{B} = \emptyset$ , то  $cl = 4$ , end, иначе:

**6 шаг:** если  $\mathbf{B} \neq \emptyset$ , то  $cl = 5$  и расчет значений массивов **Пл**, **Пн**.

8. Расчет значений массивов **Пл**, **Пн** по формулам (23, 24), а также рис. 3.10:

$$Пл = (Пл_{ilk}) \rightarrow Пл_{ilk} = 1 - zb_{ilk} / dsum_{ilk} ; \quad (5.23)$$

$$Пн = (Пн_{ilk}) \rightarrow Пн_{ilk} = \exp(-4,5 * (zb_{ilk} / dsum_{ilk})^2) . \quad (5.24)$$

Подготовим исходные данные в форме производного ФПБ (табл. 5.9). Выберем определяющий параметр для каждого из рассматриваемых факторов (механический, тепловой и химический) и выпишем формальные параметры ФПБ, соответственно выражаемые через свой определяющий параметр. Результаты сведем в табл. 5.10.

**Таблица 5.10**

Формальные и определяющие параметры

Номер фактора, $t$	Формальные параметры	Определяющий параметр фактора и его размерность
1	$v_{12}, v_{13}, s_{124}, s_{134}, r_{13}, r_{14}$	Избыточное давление $\Delta P_{\Phi}$ , МПа
2	$v_{22}, v_{23}, s_{223}, s_{234}, r_{23}, r_{24}$	Тепловой поток $q$ , МДж/м <sup>2</sup>
3	$v_{33}, s_{334}, r_{34}$	Концентрация АХОВ $n$ , мг/м <sup>3</sup>

С учетом данных экспертного анализа потенциально опасного объекта и его паспорта безопасности (табл. 3.3–3.8), найдем значения характеристик нечетких формальных параметров и сведем их в табл. 5.11.

**Таблица 5.11**

Значения характеристик нечетких формальных параметров,  
 $\rho$  — расстояние от источника до приемника воздействий

Номер $t$ фактора и размерность его параметра	Формальные параметры	Абсолютная погрешность (характеристика размытости)
---	----------------------	--

1 $\Delta P_{\Phi}$ , МПа	$v_{12}(\rho) = 4$ (1 м); 1 (2 м); 0,25 (4 м); 0,1 (6 м); $v_{13}(\rho) = 1,5$ (1 м); 1 (2 м); 0,5 (4 м); 0,1 (6 м) $s_{124}(\rho) = f_{124} \times v_{12}(\rho) = 0,4; 0,1;$ 0,025; 0,01; $s_{134}(\rho) = f_{134} \times v_{13}(\rho) = 0,75; 0,5;$ 0,25; 0,05; $r_{13} = 0,5$ $r_{14} = 0,4$ (ЛИ); 0,04 (баротравма)	2 (1 м); 0,5 (2 м); 0,125 (4 м); 0,75; 0,5; 0,25; 0,28; 0,07; 0,01; 0,51; 0,35; 0,2; 0,25; 0,2; 0,02
2 $q$ , МДж/м <sup>2</sup>	$v_{22}(\rho) = 5,44$ (1 м); 1,34 (2 м); 0,34 (4 м); 0,1 (6 м); $v_{23}(\rho) = 10$ (1 м); 8 (2 м); 6 (4 м); 2 (6 м); $s_{223}(\rho) = f_{223} \times v_{22}(\rho) = 0,54; 0,134;$ 0,034; 0,01; $s_{234}(\rho) = f_{234} \times v_{23}(\rho) = 1; 0,8; 0,6; 0,2;$ $r_{23} = 5;$ $r_{24} = 1$	2,72; 0,67; 0,17; 0,05; 5; 4; 3; 1; 0,4; 0,1; 0,3; 0,007; 0,7; 0,56; 0,42; 0,14; 2,5; 0,5;
3 $n$ , мг/м <sup>3</sup>	$v_{33} = 160;$ $s_{334} = f_{334} \times v_{33} = 80;$ $r_{34} = 100$ (удушье); $r_{34} = 400$ (потеря сознания)	80; 56; 100; 100

Полученные в табл. 5.11 значения параметров и их погрешностей можно использовать в качестве исходных данных для проведения расчетов по программе «Возмер» (информационно-алгоритмический способ) или путем подстановки в аналитические и графические зависимости, описанные в разделе 3. Здесь с позиции построения обучающих программ рассмотрим аналитический способ и обстоятельства его применения.

Для применения аналитических и графических зависимостей необходимо получить приведенный запас безопасности в функции от пространственных, спектральных и (или) временных координат, а также характеристик защиты ПОЭ, формулы (5.19)–(5.23). Кроме того, важен выбор критериев идентификации классов безопасности и вида критерия выявления предпосылки происшествия. Здесь мы ограничимся расчетом ВМ предпосылок происшествий в однопараметрической модели, формула (5.24). Результаты расчетов сведем в табл. 5.12.

Таблица 5.12

Результаты расчета дифференциальных возможных мер происшествий (исходов поражений) в предприятии с АХОВ

Номер фактора $t$ и исхода $(t, i)$	Приведенный запас безопасности, $zb = (r - s)/(\Delta r + \Delta s)$	Значение возможностной меры, $\pi_n$
1		
1.1	$zb_{123} = 0,2$ (1 м); 1,27 (2 м); 1,83 (4 м);	0,998 (1 м); $9 \cdot 10^{-4}$ (2); $4 \cdot 10^{-7}$ (4) — поражение цистерны транспортером;
1.2	$zb_{124} = 0$ (1 м); 1,11 (2 м) — летальный исход	1,0; 0,004 — поражение оператора транспорта;
1.3	$zb_{124} = 0$ (1 м); 0 (2 м); 0 (4 м); 0,2 (6 м) — баротравма	1; 1; 1; 0,835 (6 м) — травм. операторов трансп. или ХКЦ;
1.4	$zb_{134} = 0$ (1 м); 0 (2 м); 0 (4 м); 0,63 (6 м) — баротравма	1; 1; 1; 0,167 (6 м) — поражение операторов ХКЦ
2		
2.1	$zb_{223} = 1,54$ (4 м)	$2,3 \cdot 10^{-5}$ — тепловое инициирование ХКЦ;
2.2	$zb_{234} = 0$ (1 м); 1,25 (6 м)	1; $9 \cdot 10^{-4}$ — тепловое поражение операторов ХКЦ
3		
3.1	$zb_{234} = 0,128$ — (удушие);	0,928 — химическое поражение операторов ХКЦ;
3.2	$zb_{234} = 2,051$ — (потеря сознания)	$6 \cdot 10^{-9}$ — химическое поражение операторов ХКЦ

### 5.1.6. Анализ полученных результатов оценки собственной безопасности и риска предприятия с АХОВ

Для получения полной (или условно полной в рамках построенного производного ФПБ системы) вероятности отдельного вида поражения  $p_{ii}^B$  необходимо значение возможностной меры  $\pi_n$ , столбец 3, табл. 5.12, умножить на произведение вероятности инициирования  $\xi$  оператором разрыва газового баллона транспорта и вероятности травления газа  $p_{Tr}$  из баллона:

$$p_{ii}^B(t, i) = \pi_n(t, i) \times \xi \times p_{Tr}. \quad (5.25)$$

Например, для строки (1.2) табл. 5.12, описывающей летальный исход оператора транспортного или ХКЦ, верхняя граница вероятности ЛИ оператора найдена как

$$p_{12}^B = \pi_n(1,2) \times \xi_1 \times p_{\text{Тр1}} = 10^{-6} (\rho = 1\text{м}); 4 \cdot 10^{-9} (\rho = 2\text{м}). \quad (5.26)$$

При этом взяты данные статистического анализа происшествий и откатов на объекте:

$$\begin{aligned} \xi_1 &\approx 10^{-4} \text{ (число нарушений/год);} \\ p_{\text{Тр1}} &\approx 10^{-2} \text{ (вероятность АО баллона).} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Вероятности других исходов рассчитываются по аналогии.

*Оценка интегрального риска системы.* Обозначим множество значений вероятностей всех рассмотренных исходов, рассчитанных по формулам (5.25), (5.26) и данным табл. 5.12, следующим образом:  $P_n(T_i, I_t) = (p_{it}^B)$ .

Показатель интегрального риска определим по формуле [30]:

$$R_U(\text{ПКБалт-Р}) = \sum_{t=1}^3 \sum_{i=1}^{I_t} (p_{it}^B \cdot u_{it}), \quad (5.28)$$

где  $p_{it}^B$  — верхняя граница вероятности исхода  $(t, i)$ , формула (5.25);

$u_{it}$  — ущерб, наносимый системе при возникновении исхода  $(t, i)$ ;

$I_t$  — переменный номер количества рассмотренных исходов при действии фактора с номером  $t$ .

Как следует из формулы (5.28), показатель интегрального риска зависит как от сомножителей  $p_{it}^B$  и  $u_{it}$ , так и от полноты анализа системы (множества факторов и исходов поражения). Разумеется, чем полнее анализ и описание последних, тем точнее оценка риска.

Для примера произведем оценку интегрального риска рассмотренной системы по полученным расчетным данным и принятым допущениям, табл. 5.12, формулы (5.26), (5.27), а также по имеющимся субъективным оценкам ущерба, описываемого множеством  $U_1 = (u_{it})$  относительно рассмотренных исходов происшествий.

Сделаем следующие предположения и замечания.

1. Рассматриваемый период времени — 1 год.
2. Ожидаемый совокупный ущерб от одного происшествия выражен в МРОТ.
3. Значение «стоимости — ущерба» совокупного летального исхода в одном происшествии по аналогии с ОСАГО — 2500 МРОТ, значение ущерба от повреждения зданий и конструкций равно их балансной стоимости. При этом оценочные данные по ущербу, выраженные в МРОТ, приведены в табл. 5.13.

4. Исходы происшествий проявляются как простейший пуассоновский поток.

Таблица 5.13

Расчетные и оценочные данные по вероятности, возможности, ущербу, а также расчетные значения вероятностного и возможностного дифференциального риска применительно к каждому исходу происшествия

Номер исхода	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.1	3.1	3.2
$p_i^B$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-10}$	$0,92 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-15}$
$u_i$ , МПОТ	$10^4$	2500	250	250	$10^6$	2500	2500	250
$\pi_n(t, i)$	0,998	1,0	1,0	1,0	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,0	0,928	$6 \cdot 10^{-9}$
$r_U(p)$ , МПОТ	$10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$
$r_U(\pi)$ , МПОТ	9980	2500	250	250	23	2500	2400	$1,5 \cdot 10^{-6}$

В результате подстановки расчетных и оценочных данных по ущербу в формулу (5.28) и, для сравнения, в формулу (3.92) раздела 3 получаем следующие значения вероятностного и возможностного интегрального риска:

$$R_U(p) = 0,017 \text{ (МПОТ)}; R_U(\pi_n) = 9980 \text{ (МПОТ)}. \quad (5.29)$$

Очевидно, такое значительное расхождение связано с асимптотическим характером возможностной оценки, с одной стороны, и заниженной оценкой вероятностей нарушений и отказов устройств — с другой.

### 5.1.7. Выводы

На основе данных факторного параметрического анализа и выявленных предпосылок происшествий произведен приближенный расчет показателей риска системы «предприятие с АХОВ — нерегламентированные факторы — средства и мероприятия защиты».

На примере конкретной системы впервые выполнен сравнительный анализ возможностей аналитического и информационно-алгоритмического способов оценки показателей риска.

С точки зрения создания обучающей программы, эти способы взаимно дополняют друг друга и позволяют, с одной стороны, выявить роль и значимость исходных данных на этапе экспертной оценки и значительно ускорить процесс вычислений путем организации условных вычислительных процедур — с другой.

Полученные значения дифференциального и интегрального риска носят приближенный характер, однако позволяют количественно обосновать проведение организационных и технических мероприятий по повышению безопасности в сложной технической системе.

## 5.2. Факторное параметрическое моделирование и обоснование системы «имитационно-тренажерный комплекс — оператор повышенного риска»

**Введение.** <sup>iii</sup> Анализ технической документации на образцы техники, а также анализ параметров факторов, действующих на операторов повышенного риска, позволяет экспертам ввести систему вида «технический объект — рабочая среда — оператор» (ТОРСО) и для оценки и обоснования свойств оператора применить методологию факторного параметрического моделирования [40–42, 85, 86].

Для описания рабочей среды, в которой оператор выполняет функциональную деятельность, сформируем множество  $T = (1, 2, \dots, tT)$  видов факторов: 1 — механический; 2 — тепловой (термодинамический); 3 — электрический (электромагнитный); 4 — радиоактивный; 5 — фооновый (рентгеновское и гамма-излучения); 6 — оптический (волны инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения); 7 — химический (реакции горения, восстановления и др.); 8 — биологический (бактериологические, физиологические реакции и др.); 9 — информационный фактор. Источники воздействий этих видов факторов представим в виде множества номеров  $L = (1, 2, \dots, lL)$ .

В рамках данной работы предполагается, что существуют *предпосылки* ошибок оператора, источники воздействий и их связи в системе, описывающие возможность образования элементарных отказов (ошибок оператора). Под *ошибкой оператора* понимается появление состояния психологического стресса, обусловленного перегрузкой сенсорной системы и (или) информационной перегрузкой. При этом у оператора временно утрачивается способность осмысленной деятельности, но сохраняются моторные реакции.

### 5.2.1. Построение факторного параметрического базиса системы «технический объект — рабочая среда — оператор»

Анализ деятельности операторов повышенного риска, к которым можно отнести, например, авиадиспетчеров и операторов оборонных комплексов, позволяет представить ряд их профессионально психофизиологических качеств, необходимых для успешного выполнения функциональных обязанностей, в виде множества  $K = (1, 2, \dots, kK)$  следующих характеристик восприимчивости операторов: 1 — память (уровень развития долговременной, оперативной и произвольной памяти); 2 — мышление; 3 — внимание; 4 — физиологическая выносливость сенсорной системы; 5 — зрение; 6 — слух; 7 — чувствительность к запахам; 8 — чувствительность к вкусам; 9 — чувствительность к прикосновению, вибрации.

Вследствие воздействия негативных факторов рассматриваются следующие возможные предпосылки ошибок оператора:

- состояние стресса вследствие физического переутомления (длительное превышение физических воздействий значений восприимчивости сенсорной системы);
- информационная перегрузка;
- резкое ухудшение самочувствия;
- комбинации этих предпосылок.

В качестве характеристики восприимчивости оператором информационного потока рассматриваются психофизиологические проявления (или не проявления) внимания в сенсорных процессах. Установлено [87], что на внимание и эффект действия оператора повышенного риска оказывают влияние как информационный фактор, так и физические факторы рабочей среды.

В качестве информационного фактора рассматривается общий поток информации (релевантной и иррелевантной), получаемый оператором по сенсорным каналам. В качестве количественных характеристик потока информации принимаются: общее количество элементарных носителей информации в ситуации (количество транспарантов на табло, количество бит в сообщении, количество различающихся сигналов, количество запахов) и частота их смены. В работах [86, 87] установлено, что воздействие информационной нагрузки на оператора может быть представлено в виде аддитивной составляющей по каждому из каналов сенсорной системы.

Анализ работ [38, 41, 78, 79] показал, что все рассматриваемые ошибки и происшествия в системе «технический объект — рабочая среда — оператор» можно однозначно выразить на основе лингвистической формулы «воздействие — ослабление или исключение видов факторов — восприимчивость оставшихся видов — ошибка оператора».

В развитие этого подхода, на основе 1) известных характеристик рабочей среды, 2) массогабаритных и физико-химических характеристик технических объектов, 3) средних значений характеристик восприимчивости оператора, получаемых по данным профессиографического исследования, была построена схема факторных связей источников и приёмников воздействий (рис. 5.1).

Приведенная схема иллюстрирует характер влияния  $i$  источника воздействия (вида фактора рабочей среды) на  $j$  психофизиологическую характеристику (на схеме графически обозначается множество возможных комбинаций воздействий видов факторов на оператора) в виде дуг от  $i$  источника к  $j$  приемнику. Причем в случае комбинированного влияния на схеме это может отображаться в виде дополнительного псевдоисточника воздействия, объединяющего  $x_i$  и  $x_{(i+n)}$  воздействия, например  $X1X2$ , рис. 5.1.

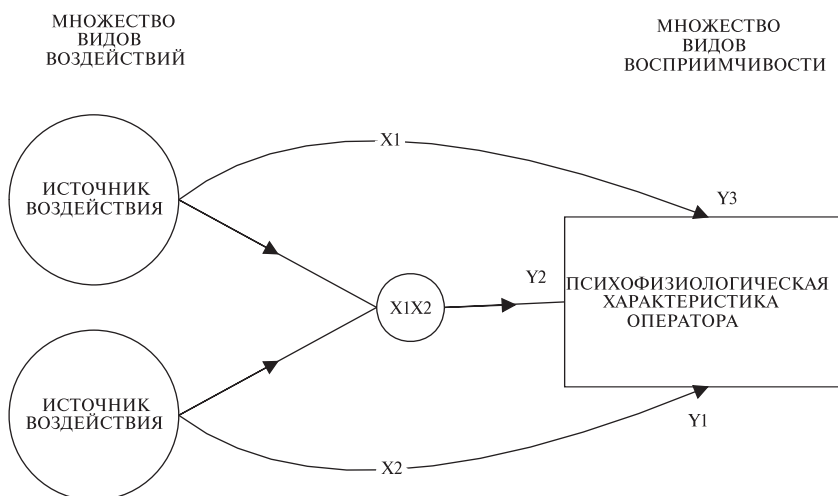
С точки зрения возможности возникновения ошибок в ТОРСО вследствие перегрузки  $j$  анализатора сенсорной системы оператора полученная схема позволяет ранжировать по значимости каждую из  $y_i$  комбинаций воздействий.

При этом логическая форма функции связности ошибок оператора от недопустимых воздействий факторов рабочей среды имеет вид:

$$Y = Y1 \vee Y2 \vee Y3 = X1 \vee X1X2 \vee X3, \text{liv} \quad (5.30)$$

где (рис. 5.1)

$$Y1 = X1; Y2 = X1X2; Y3 = X3$$





**Рис. 5.1. Структурная схема влияния факторов рабочей среды на психофизиологические характеристики оператора**

Как показал анализ способов представления свойств личности человека-оператора, характеристики восприимчивости сенсорной и психофизиологической систем оператора к действию каждого вида факторов целесообразно выражать в виде нечетких параметров  $\tilde{R}$  на множестве  $\Lambda$ , где  $\mu_r(\lambda)$  — функция принадлежности, а  $\lambda$  — носитель нечеткого множества  $\tilde{R}$ . При этом [4, 5] в качестве функции принадлежности выбираются функция Гаусса, трапециевидная или треугольная функции.

На основе экспертного анализа множества  $\mathbf{K}$  характеристик восприимчивости оператора к воздействию учитываемых факторов множества  $\mathbf{T}$ , формируется множество видов производных параметров,  $\mathbf{M} = (m = 1$  — температура  $t$ , °C;  $m = 2$  — тепловой поток  $q$ , Вт · м<sup>-2</sup>; и т. д.).

В соответствии с определенной схемой связей видов факторов рабочей среды и характеристик восприимчивости оператора к их воздействию формируются множества  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{R}$  (табл. 5.14, 5.15) в следующем виде:

$\mathbf{V} = (v_{ml})$ , где  $v$  — зависящий от времени нечеткий с функцией принадлежности  $\mu_v(\lambda)$  параметр  $m$  вида, представляющий фактор  $t$  вида, действующего от  $l$  источника;

$\mathbf{R} = (r_{mjk})$ , где  $r$  — зависящий от времени нечеткий с функцией принадлежности  $\mu_r(\lambda)$  параметр  $m$  вида, представляющий фактор  $t$  вида, который воспринимает  $k$  вид сенсора оператора.

Таблица 5.14

$\mathbf{V}$	$l_1$	...	$l_n$
$t_1$	$v_{11}$		$v_{1l}$
...			
$t_n$	$v_{n1}$		$v_{nl}$

Таблица 5.15

$\mathbf{R}$	$k_1$	...	$k_n$
$t_1$	$R_{11}$		$r_{1k}$
...			
$t_n$	$r_{n1}$		$r_{nk}$

Пусть известны защитные функции конструкции и средств безопасности технической системы, которые в общем случае описаны нечетко из-за наличия погрешностей в их определении. Множество нечетких функций ослабления при передаче различных видов воздействий от источников непосредственно к оператору задается в виде:  $\mathbf{F} = (f_{mlk})$ , где  $f$  — нечеткое значение коэффициента ослабления,  $f \in [0, 1]$ , описанного функцией принадлежности  $\mu_f(v) \in [0, 1]$  параметра  $m$  вида, представляющего  $t$  вид материального фактора, действующего от  $l$ -го источника на  $k$  вид сенсора оператора.

На основе объединения введенных множеств видов воздействий факторов рабочей среды, восприимчивости оператора, характеристик ослабления или усиления влияния факторов среды на оператора, а также логических функций связности построена множественная модель предпосылок возникновения ошибки оператора в виде *факторного параметрического базиса* (ФПБ):

$$\text{ФПБ} = \{V, F, R, T, L, K, M, Y\}. \quad (5.31)$$

### **5.2.2. Обоснование применения и оценка эффективности обучения операторов в системе «имитационно-тренажерный комплекс — оператор повышенного риска»**

Введенный ФПБ (5.31) позволяет поставить задачу оценки и обоснования эффективности обучения операторов повышенного риска на основе применения имитационного тренажерного комплекса (ИТК).

В качестве параметров имитации воздействий на оператора в ИТК определены следующие (рис. 5.2):

- 1) для теплового фактора — температура воздуха;
- 2) для оптического фактора — количество одновременно контролируемых объектов;
- 3) для звукового фактора — звуковое давление;
- 4) для вибрации — интенсивность колебаний, продолжительность колебаний;
- 5) для информационного фактора — объем информации, предъявляемый оператором посредством информационных элементов за 1 секунду, полагая, что каждое информационное сообщение несет в себе объем информации равный 1 байту.

В качестве параметров восприимчивости оператора приняты:

- усредненные физиологические характеристики восприимчивости сенсорной системы оператора к воздействию физических факторов;
- психофизиологическая характеристика внимания оператора по данным профессиограммы.

Сформировано множество видов производных параметров воздействий:  $M = (m = 1$  — температура  $t$ , °C;  $m = 2$  — тепловой поток  $q$ , кВт · м<sup>-2</sup>;  $m = 3$  — яркость объекта  $\nu$ , лк;  $m = 4$  — количество различных объектов  $n$ , шт;  $m = 5$  — звуковое давление  $\omega$ , дБ;  $m = 6$  — длительность  $\tau$ , с;  $m = 7$  — объем информации  $V$ , кб;  $m = 8$  — время позиционирования  $T$ , с).

По аналогии с рассмотренной выше методикой построения общей схемы факторных связей в системе ТОРСО (рис. 5.1), относительно вы-

бранных предпосылок ошибок оператора в ИТК построена графическая модель влияния параметров рабочей среды на психофизиологические характеристики (ПФХ) сенсорной системы оператора (рис. 5.2). При этом установлены и ранжированы виды факторов и их комбинации, а также получена логическая форма функции связности предпосылок ошибки оператора от источников воздействий и характеристик приемников воздействий (сенсорной системы оператора):

$$Y=Y1 \vee Y2 \vee Y3 \vee Y4, \quad (5.32)$$

где:

$$Y1 = X1 \vee X1X2 \vee X1X3 \vee X3X1 \vee X1X4 \vee X1X2X3X4 \vee X1X2X3 \vee X2X3X4;$$

$$Y2 = X1X2 \vee X2 \vee X4X2 \vee X4X3;$$

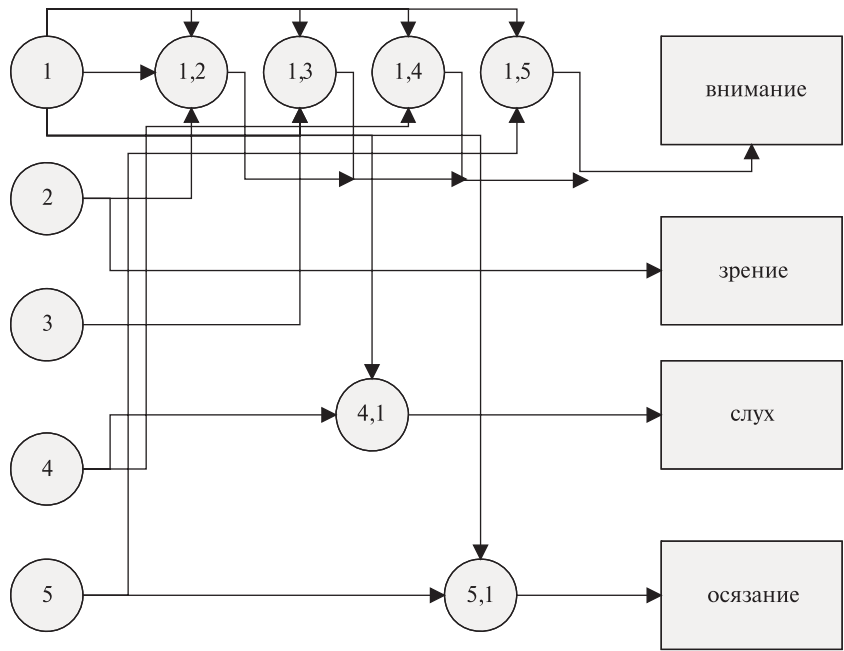
$$Y3 = X1X3 \vee X1X3X4 \vee X3X4;$$

$$Y4 = X5 \vee X1X5;$$

В результате подстановки функций  $Y1 \dots Y4$  в выражение (5.32) получим:

$$\begin{aligned} Y = & X1 \vee X1X2 \vee X1X3 \vee X3X1 \vee X1X4 \vee X1X2X3X4 \vee X1X2X3 \vee \\ & \vee X2X3X4 \vee X1X2 \vee X2X4 \vee X2 \vee X4X3 \vee X1X3 \vee X1X3X4 \vee X3X4 \vee \\ & \vee X5 \vee X1X5. \end{aligned} \quad (5.33)$$

Для выбранных параметров факторов рабочей среды на основе анализа типовой инструкции для операторов (ТОИ Р01-00-01-96) и санитарно-эпидемиологических норм к рабочему месту оператора (СанПиН 2.2.2.542-96) для расчетов были взяты их предельно допустимые и ориентировочно-безопасные значения.



**Рис. 5.2. Структурная схема факторных связей учета влияния факторов рабочей среды на психофизиологические характеристики оператора**

На основе проведенного анализа логико-лингвистической модели видов и характеристик воздействий среды на характеристики оператора были получены следующие множества производного факторного параметрического базиса системы «ИТК — оператор» (табл. 5.16):

**Таблица 5.16**

Значения множеств производного факторного параметрического базиса системы «ИТК — оператор»

<b>V</b>				
1,7; 0,4	1,15; 0,35	6,3; 0,4	0,4; 0,3	0,8; 0,2
<b>R</b>				
3,1; 0,6	4,3; 0,8	8,5; 0,8	1,2; 0,4	3,5; 0,8
<b>F</b>				
1	1	1	1	1
0,8	1	0,5	0,5	
0,8	1	1		

1	1			
1				

Для варианта самой неблагоприятной комбинации ошибок оператора при воздействии выбранных факторов рабочей среды нечеткая форма логической функции связности (5.33) имеет вид:

$$\pi(y) = \max(\pi(y1), \pi(y2), \pi(y3), \pi(y4)), \quad (5.34)$$

где

$$\pi(y1) = \max(x1, \min(x1, x2), \min(x1, x3), \min(x1, x4), \min(x1, x2, x3, x4), \min(x1, x2, x3), \min(x2, x3, x4));$$

$$\pi(y2) = \max(\min(x1, x2), x2, \min(x4, x2), \min(x4, x3));$$

$$\pi(y3) = \max(\min(x1, x3), \min(x1, x3, x4), \min(x3, x4));$$

$$\pi(y4) = \max(x5, \min(x5, x1)).$$

В результате подстановки исходных данных табл. 5.16 в программу расчета «Возмер» [2] был произведен расчет возможностной меры происхождения в ИТК в зависимости от психофизиологической перегрузки оператора. Полученное значение возможностной меры ошибки ( $\text{Pos}(y) = 0,013$ ) свидетельствует о допустимости имитации выбранных видов факторных воздействий с заданными характеристиками в имитационном тренажерном комплексе, поскольку мера безошибочных действий оператора

$$D = 1 - \text{Pos}(y) = 0,987; D > D_{\text{тр}} = 0,51. \quad (5.35)$$

### 5.2.3. Заключение

Таким образом, проведена апробация метода факторного параметрического моделирования предпосылок появления ошибок оператора повышенного риска в системе «технический объект — рабочая среда — оператор» и продемонстрированы возможности применения системы «имитационно-тренажерный комплекс — оператор повышенного риска» для обучения операторов с оценкой уровня эффективности. При этом расчет возможностной меры предпосылок ошибок оператора, основанный на учете факторных связей и степени влияния параметров факторов рабочей среды на психофизиологические характеристики оператора, может быть проведен даже в условиях неполноты и неточности данных о характеристиках компонентов системы «имитационно-тренажерный комплекс — оператор повышенного риска».

### 5.3. Инженерная методика определения функций преобразования теплового воздействия в конструкции объекта

#### 5.3.1. Постановка задачи

1. *Содержательное описание опасности анализируемой системы.* Относительно самого нежелательного исхода (СНИ) аварийной ситуации — горения и взрыва горючего материала ПБСТ в задаче рассматривается объект, представляющий *полуограниченное тело*. С позиций возможности подвода теплового воздействия от внешнего источника, например от очага пожара, анализируется конструкция и теплозащита как объекта, так и его потенциально опасных элементов. Оценивается восприимчивость ПОЭ и производится их нумерация. Причем критическому ПОЭ присваивается последний номер. Анализируются возможные паразитные связи, которые могут иметь место между ПОЭ в объекте. Определяются значения конструктивных, теплофизических и физико-химических параметров воздействующих факторов и определяются значения параметров восприимчивости ПОЭ.
  2. *Формальное множественно-параметрическое описание системы.*
- На основе принятого (раздел 1) множественно-параметрического представления системы записываются множества:

$$\left\{ \begin{array}{l} R \supset (OR^e, OR^i); V^e \supset (OV^e, OV^e); F^e \\ V^i \supset (OV^i, OV^i); OM_1; OT_1; ON_1; \end{array} \right\} \quad (5.36)$$

причем  $OT_1 = (t = 2)$ , где  $t = 2$  — номер теплового фактора;

$OM_1 = (T, q, \tau)$ , где  $T$  — температура (K),  $q$  — тепловой поток (Вт/м<sup>2</sup>),  $\tau$  — длительность процесса (с);

$ON_1$  — упорядоченное множество пронумерованных ПОЭ,  $k = 1, 2, \dots, N \subset ON$ ,

где  $N$  — номер критического ПОЭ;

$$OV^e = OR \subseteq OM, OV^e = OR \subseteq OT. \quad (5.37)$$

Отметим, что множества  $R, V^i \supset OV^i \supset OV^i$  должны быть описаны вплоть до каждого выделенного элемента:

$$R = (r_{mt=2lk}); V^i = (v_{mtlk}^i). \quad (5.38)$$

Задача имеет смысл, если известно значение параметра восприимчивости к внешнему,  $l = 0$ , тепловому фактору хотя бы для одного ПОЭ,  $m \in \text{OM}_1$ :

$$\{\exists m \in \text{OM}_1 \wedge \exists k \in \text{ON}_1 \rightarrow r_{m,t=2,l=0,k} = \text{det}\} \quad (5.39)$$

*Экспертиза собственной опасности объекта.* В случае, если условие (5.39) выполняется, то производится формальная экспертиза собственной опасности. В результате которой:

- 1) формулируется вывод о наличии или отсутствии собственной опасности объекта;
- 2) определяются номера ПОЭ — потенциальных источников вторичных факторов, а также виды опасных факторов и виды параметров этих факторов.

*Общая формулировка задачи.* Относительно активного отказа критического ПОЭ ( $k = N$ ) требуется определить функции преобразования  $F^c$  ( $t = 2, k = N$ ) параметров,  $m \in \text{OM}_1$ , внешнего теплового фактора и на их основе оценить критические значения параметров  $T'$ ;  $q'$ ;  $\tau'$  внешнего теплового воздействия.

### 5.3.2. Общий алгоритм решения задачи и его апробация

1. Производится описание *физических процессов*, определяющих тепловой фактор, в виде *поля температур*  $T(\vec{r}, t)$  и *поля теплового потока*  $q(\vec{r}, t)$ , где  $\vec{r}$  — радиус-вектор, характеризующий пространственное распределение текущего процесса,  $t$  — время.
2. Осуществляется *пространственное описание* системы «поля теплового воздействия — ПОЭ объекта». В объекте выбирается и обосновывается геометрическая модель теплопередачи и система координат относительно критического ПОЭ.
3. Обосновываются и описываются *краевые условия задачи*.

Для одномерной теплопередачи краевые условия имеют вид:

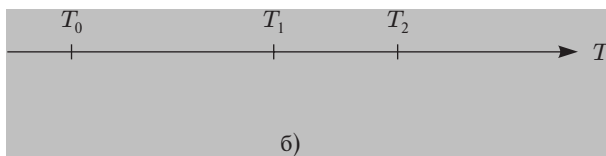
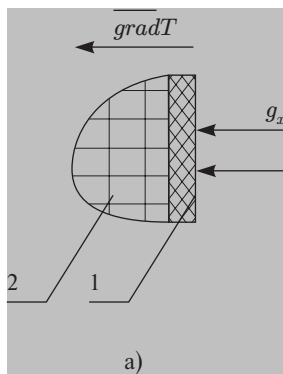
$$\begin{aligned} T(x, t=0) &= T_{or}; \quad q(x=0, t) = q_{or}, \quad \text{при } t > 0; \\ T(x, t=0) &= T_o; \quad q(x, t=0) = 0, \quad \text{при } x > 0, \end{aligned} \quad (5.40)$$

где  $x$  — градиентная координата;  $T_{or}$ ;  $q_{or}$  — температура и тепловой поток очага (внешнего источника).

4. Обоснование и описание *критериев инициирования* (поджига и (или) взрыва материала) ПОЭ объекта. Из известных критериев [14, 30, 61, 73, 74] для оценки выбирается температурный критерий инициирования [30, 74], который иллюстрируется на рис. 5.3. Принимается, что

при  $T \geq T_1$  происходит вспышка и горение материала, при  $T \geq T_2$  — взрыв горючего (ВВ) ПОЭ, причем:

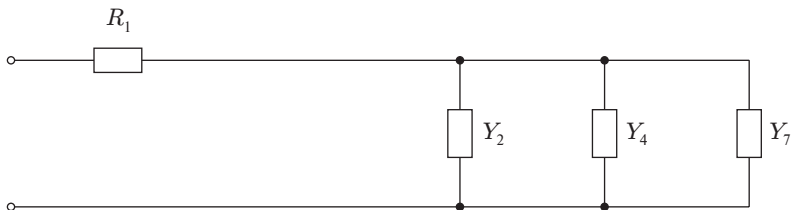
$$T_0 < T_1 < T_2 \leq T_{or}. \quad (5.41)$$



**Рис. 5.3**

### 5. Анализ физических явлений задачи и построение математических моделей.

Физическая картина теплопередачи рассматривается в модели инерционного слоя [35]. Причем сначала рассматривается непринудительный, а затем регулярный разогрев в виде движения тепловой волны, который происходит по координате  $x$ , рис 5.4.



**Рис. 5.4<sup>IV</sup>**



Температурное поле имеет градиент в инерционном слое, в котором идет поглощение тепла, описываемое одномерным уравнением теплопроводности:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T^2}{\partial x^2}. \quad (5.42)$$

Принимается, что тепловая волна распространяется преимущественно по каналу (материалу) с максимальной теплопроводностью  $\lambda$ . Для расчета коэффициента передачи  $K_i$  энергии теплового потока, подводимого к  $i$  участку тела, применяется метод эквивалентных тепловых цепей [35]:

$$K_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^I Y_i}, \quad (5.43)$$

где  $Y_i = \frac{\lambda_i S_i}{l_i}$  — интегральная проводимость участка  $i$ , у которого  $\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности,  $S_i$  — площадь поперечного сечения,  $l_i$  — длина участка (слоя);  $I$  — общее число параллельных участков теплопередачи.

В каждой параллельной цепи длительность нагрева определяется на основании критериев Био и Фурье по распределению температурного поля в объемной слоистой среде, характеризуемой температуропроводностью участка цепи  $a_i = l_i / (C_i \rho_i)$ , где  $C_i$  — удельная <sup>lvi</sup>теплопоглощаемость — плотность вещества участка.

Интенсивность проходящего теплового потока в цепи, состоящей из последовательных участков, определяется ее интегральной проводимостью  $Y = \frac{\lambda S}{l}$  и количеством поглощаемой (аккумулированной) тепловой

энергии в текущем сечении слоя  $q(x) = x C \rho \Delta T$ .

В данном типе задач выполняется следующее соотношение толщины  $\delta$  термического прогрева и длины  $l$  участка:  $\delta \ll l$ .

Это означает, что тепловая волна подойдет к критическому ПОЭ по пути, характеризуемому координатой  $x_k$  через некоторое время с начала процесса, оцениваемое длительностью  $\tau_k^*$ . Тогда на расстоянии толщины  $\delta$  прогрева во фронте тепловой волны справедливы соотношения:

$$T_{l=0,k} = T(x_k, \tau_k^*), \quad (5.44)$$

$$q_{l=0,k} = q_{нозн}(x_k, \tau_k^*). \quad (5.45)$$

В принятых допущениях зависимости (5.44), (5.45) определяют последовательный тепловой прогрев участков с учетом условия  $q_{\text{подв}} = q_{\text{погл}}$ .

Таким образом, при известном температурном параметре восприимчивости критического ПОЭ ( $r_{12k} = T_k^*$ ) и при *дополнительно* определяемом энергетическом пороге инициирования его материала, даваемом в виде второго параметра восприимчивости ( $r_{22k} = q_k^*$ ), задача сводится к нахождению *длительности*  $\tau'_k$  установления распределения температурного поля  $T(x, \tau)$  и плотности теплового потока  $q(x, \tau)$  в точке с координатой, равной  $x = x_k$ , с *последовательным (логическое произведение)* выполнением условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x = x_k, \tau = \tau'_k) \geq T_k^* \wedge q(x = x_k, \tau = \tau'_k) \geq q_k^*, \\ \tau_i = \begin{cases} \frac{l_i^2}{2a_i} & \text{— для модели участка в виде полуограниченного стержня,} \\ \frac{F_0 \Delta_i^2}{a_i} & \text{— для участка в виде сферы,} \end{cases} \end{array} \right. \quad (5.46)^{\text{vii}}$$

где  $F_0$  — число Фурье.

Таким образом, система зависимостей (5.46) в *неявном виде* представляет *функции преобразования*

$$F_{i=2, k=N}^e = (f_{T_{2N}}(\eta, \varepsilon, \nu), f_{q_{2N}}(\eta, \varepsilon, \nu), f_{\tau_{2N}}(\eta, \varepsilon, \nu)). \quad (5.47)$$

На основании зависимостей (5.46), (5.47) для объектов с полуограниченными конструкциями типа «цилиндр — сфера — стержень» (рис. 5.4) с погрешностью, не превышающей (30...40) %, были установлены *критические значения параметров* [35, 75]:

$$T^l = T_K^* = 670 \text{ К}, q^l = q_K^* = 10^7 \text{ Вт/м}^2, \tau^l = \tau_K^l = 120 \text{ с},$$

при воздействии на потенциально опасные элементы объекта внешнего или вторичного теплового фактора. Эти результаты могут быть использованы при расчете риска в п. 5.1, табл. 5.4, 5.10–5.13.

#### 5.4. Расчет показателей риска системы «человек — жилой блок — опасные и вредные факторы — средства защиты»

*Постановка задачи.* Дана система: «человек — жилой блок — опасные и вредные факторы — средства защиты» (Ч — ЖБ — ОВФ — СЗ).

В качестве потенциально опасных элементов жилого блока рассматриваются: газовые магистраль и плита, электрическая сеть и бытовые электроприемники, горючие пожароопасные вещества и материалы помещений. В качестве средств защиты используются тепловые датчики пожарной сигнализации и устройства защитного зануления<sup>lviii</sup>. Понимается, что электроприемники выполнены без искрогасителей при коммутации цепей (что часто встречается на практике). Известны конструктивные, массогабаритные и физико-химические характеристики ПОЭ, что позволяет экспертным путем на уровне  $\alpha$ -среза в виде интервалов установить нечеткие параметры восприимчивости  $R_\alpha$ , инициирования  $S_\alpha$  и ослабления  $F_\alpha$  воздействий. Надежность средств защиты выразим вероятностью отказа  $q_{СЗ}$ .

В ходе предварительного анализа установлено, что максимальный ущерб другим системам (окружающей среде) способен нанести *пожар* в жилом блоке. Вследствие этого пожар в системе выбирается в качестве критического происшествия  $C$ .

Установлено, что помещения жилого блока содержат твердые вещества с классом горючести категории Д, а материалы в помещениях соответствуют группе горючести Г2, которые характеризуются критической поверхностной плотностью теплового потока (КППТП)  $20 \leq q^{кр} \leq 35 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  (ГОСТ 30402-96).

**Требуется** оценить интегральный риск рассматриваемой системы.

*Решение задачи.*

1. По уровню ущерба упорядочим и пронумеруем следующие потенциально опасные элементы: 1 — газовые магистраль и плита; 2 — электрическая сеть и бытовые электроприемники; 3 — локальный объем, где возможно инициирование диффузионного и (или) кинетического горения газовой-воздушной смеси; 4 — горючие пожароопасные вещества и материалы жилого блока. Обозначим внешние по отношению к системе источники и приемники опасных воздействий (в том числе нерегламентированные действия человека) номером 0. Выберем следующие возможные происшествия, характеризующие интегральный риск системы: 1) разрыв магистрали и разлет осколков; 2) поражение человека электрическим током; 3) пожар в жилом блоке. По отношению к этим исходам сформируем множество видов ОВФ:  $T1 = (t = 1$  — механический; 2 — тепловой; 3 — электрический; 4 — химиче-

ский фактор). На основе анализа критериев восприимчивости ПОЭ к воздействию учитываемых факторов **T1**, а также инициирования ими вторичных факторов сформируем множество видов производных параметров, **M1** = ( $m = 1$  — напряжение  $\sigma$ ,  $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $m = 2$  — тепловой поток  $q$ ,  $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $m = 3$  — температура  $T$ , К;  $m = 4$  — количество вещества  $n$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $m = 5$  — плотность электрического тока  $j$ ,  $\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $m = 6$  — длительность  $\tau$ , с).

- Установим подмножества **OV**, **OF**, **OR**. В частности, на основе анализа исходной информации подмножества **OV<sup>e</sup>** и **OV<sup>i</sup>** имеют вид: **OV<sup>e</sup>** = (1, 1, 1, 1);

$$\mathbf{OV}^i = (k = 1: 1, 0, 0, 1; k = 2: 0, 1, 0, 1; k = 3: 1, 1, 0, 1; k = 4: 1, 1, 0, 1).$$

Заметим, что  $e$  — обозначает внешние (0) источники,  $i$  — внутренние источники,  $i = k$ .

Позиции в подмножествах соответствуют номерам факторов.

В результате получим следующее подмножество — пересечение **OB**:

$$\begin{aligned} \mathbf{OB}^e (l = 0 \rightarrow k) &= (k = 1: 1, 1, 0, 0; k = 2: 1, 1, 1, 0; k = 3: 0, 1, 0, 0; k = 4: 1, 1, 0, 1); \\ \mathbf{OB}^i (l \rightarrow k) &= ((l = 1): (k = 2: 0, 0, 0, 0; k = 3: 0, 0, 0, 1; k = 4: 1, 0, 0, 1); \\ (l = 2): (k = 3: 0, 1, 0, 0; k = 4: 0, 1, 0, 0); (l = 3): (k = 4: 1, 1, 0, 1)). \end{aligned} \quad (5.48)$$

- На основании данных, имеющих в выражении (5.48), построена структурная схема факторных связей источников и приемников (рис. 5.5), где номерами показаны виды факторов, соответствующие единицам в подмножестве **OB**.
- Результаты анализа условий инициирования ПОЭ, образования вторичных факторов и представления их в форме ФПБ1<sup>ix</sup> представим в виде табл. 5.17.

Отметим, что приведенные в табл. 5.17 результаты условно выражают элементы множества — пересечения **B<sup>Cr</sup>**, выявленные по критерию непустоты (1.19) и конкретных его результатов (1.23), полученных для рассматриваемой системы.

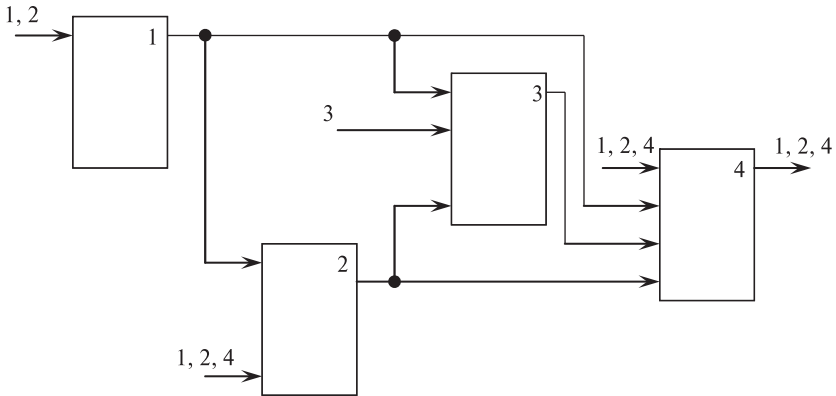


Рис. 5.5. Факторная связность



Таблица 5.17

Результаты анализа условий иницирования ПОЭ

Номер ПОЭ	Условия иницирования: 1 — в физических производных параметрах; 2 — в форме параметров МПБ1	Результат иницирования и представление вторичных факторов в форме МПБ1
ПОЭ1	1: $(\sigma_0 \geq \sigma_{\text{трещ.}}) \vee (T_0 \geq T_{\text{разр}}) \vee$ (Ч: $(\sigma_0 \leq \sigma_{\text{рук}} \mid (\text{дефект рукоятки-регул.})))$ ; 2: $(s_{1101} \geq r_{111}) \vee (s_{3201} \geq r_{321}) \vee (s_{4401} \geq r_{441})$	травление газа, разрывы, разлет элементов: $t=1,4; \sigma_1; n_1; \tau_1 \rightarrow v_{111}; v_{111}$
ПОЭ2	1: $(\text{все коммутаций}) \vee (\sigma_0 \geq \sigma_{\text{кз из.}}) \vee$ $((T_0 \geq T_{\text{разл из.}}) \wedge (\tau_{\text{разл}} \geq \tau_{\text{защ. откл.}}))$ 2: $(s_{1102} \geq r_{112}) \vee ((s_{3202} \geq r_{322}) \wedge (s_{6202} \geq r_{622}))$	образование искры, тепловыделение: $q_2; T_2 \rightarrow v_{222}; v_{322}$
ПОЭ3	1: $(fT \geq T_3) \wedge ((\tau_{\text{диф}} \geq \tau_{\text{всп}}) \wedge (fn_0 \geq n_3))$ 2: $((s_{3203}^{\text{C3 (безC3)}} \geq r_{323}) \vee (s_{3223} \geq r_{323})) \wedge$ $(s_{3223} \geq r_{443}) \wedge (s_{6423} \geq r_{643})$	диффузионное горение: $q_3; T_3; \tau_3; n_3$ (продукты гор.) $\rightarrow v_{223}; v_{323}; v_{623}; v_{443}; v_{643}$
ПОЭ4	1: $((fT \geq T_4^{\text{всп}}) \wedge (\tau_{\text{диф}} \geq \tau_4^{\text{всп}})) \vee$ $((fq \geq q_4^{\text{кр}}) \wedge (fn \geq n_4^{\text{кр}}))$ ; 2: $((s_{2204}^{\text{C3 (безC3)}} \geq r_{224}) \vee (s_{2233} \geq r_{224})) \wedge ((s_{4404} \geq r_{444}) \vee (s_{4414} \geq r_{444}) \vee (s_{4434} \geq r_{444}))$ $\wedge ((s_{6404} \geq r_{644}) \vee (s_{6414} \geq r_{644}) \vee (s_{6234} \geq r_{444}))$ $\vee ((s_{3204}^{\text{C3 (безC3)}} \geq r_{324}) \wedge (s_{6204} \geq r_{624})) \vee$ $\vee (s_{3224}^{\text{C3 (безC3)}} \geq r_{324}) \wedge (s_{6204} \geq r_{624})$	Сам. подд. пожар: $q_4; T_4; \tau_4; n_4$ (продукты гор.); $\sigma_{\text{т. в.}} \rightarrow v_{223}; v_{323}; v_{623}; v_{443}; v_{643}$

5 Объединим выполнение этапов 5 и 6 алгоритма решения задачи, п. 4.2.

Преобразуем условия инициирования ПОЭ в форме МПБ1 (табл. 5.17) соответственно в логическую и «нечетко-параметрическую» форму. Логическую форму функции связности приведем для краткости только для ПОЭ4:

$$Y_4 = (Y_{2204} \vee Y_{2234})(Y_{4404} \vee Y_{4414} \vee Y_{4434})(Y_{6404} \vee Y_{6414} \vee Y_{6234}) \vee Y_{3204} Y_{6204} \vee Y_{3234} Y_{6204}. \quad (5.49)$$

Опустив промежуточные выкладки, запишем:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \max(\pi_{1101}, \pi_{3201}, \pi_{4401}); \Pi_2 = \max(\pi_{3302}, \pi_{1102}, \min(\pi_{3202}, \pi_{6202})); \\ \Pi_3^{C3} &= \min((1 - q_{C3}), \min(\Pi_1, \pi_{4413}^{C3}), \min(\Pi_2, \pi_{6423}^{C3}), \\ &\max(\min(\Pi_2, \pi_{3203}^{C3}), \min(\Pi_2, \pi_{3203}^{C3}))). \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$\Pi_3^{\text{без } C3} = \min(\min(\Pi_1, \pi_{4413}), \min(\Pi_2, \pi_{6423}), \max(\min(\Pi_2, \pi_{3203}), \min(\Pi_2, \pi_{3203}))). \quad (5.51)$$

$$\begin{aligned} \Pi_4 = \text{Pos}(Y_4 = 1) &= \max(\min(\Pi_0, \pi_{3204}, \pi_{6204}), \min(\Pi_0, \Pi_3, \pi_{3234}, \pi_{6204}), \\ &\min(\max(\min(\Pi_0, \pi_{2204}), \min(\Pi_3, \pi_{2234})), \max(\min(\Pi_1, \pi_{4414}), \\ &\min(\Pi_3, \pi_{4434}), \min(\Pi_0, \pi_{4404})), \max(\min(\Pi_1, \pi_{6414}), \\ &\min(\Pi_3, \pi_{6434}), \min(\Pi_0, \pi_{6404}))). \end{aligned}$$

По исходным данным, представленным в табл. 5.17, с помощью программы «Возмер» рассчитаем значения возможностных (нечетких) мер.

При уровнях различимости  $\alpha = 0,01; 0,001$  получены расчетные значения запаса безопасности  $\bar{z}b_\alpha$ . Ввиду громоздкости массива данных приведем его значения только для ПОЭ3,  $\alpha = 0,01$ , упрощенно обозначив здесь «запас» переменной  $z$ .

С учетом средств защиты (при настройке тепловых датчиков на температуру срабатывания  $T_{\text{ТД}} = (353 \pm 20)$  К и вероятности их отказа  $q = 0,001$ ) значения запаса равны:

$$z_{4413} = 1,703; z_{6423} = 1,621; z_{3203}^{C3} = 1,580; z_{3223}^{C3} = 1,810.$$

Без средств защиты:  $z_{3203} = 0,640; z_{3223} = 0,535$ .

Приведем окончательные результаты расчетов:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= 0,08 / 0,03 \text{ (соответственно для уровня различимости } \alpha = 0,01/0,001); \\ \Pi_2 &= 0,13 / 0,07; \Pi_3^{C3} = 3 \cdot 10^{-4} / 10^{-9}; \Pi_3 = 0,4/0,095; \\ \Pi_4^{C3} &= 4,6 \cdot 10^{-5} / 10^{-7}; \Pi_4 = 0,087/0,008. \end{aligned} \quad (5.52)$$

Таким образом, получены значения нечеткой (возможностной) меры возникновения критического происшествия в виде пожара в системе: «человек — жилой блок — опасные и вредные факторы — средства защиты» с учетом физико-химических свойств восприимчивости и инициирования потенциально опасных элементов объекта, нечетких значений параметров опасных и вредных факторов, нечетких значений функций преобразования воздействий в конкретной системе, а также надежности применяемых средств защиты или с учетом их отсутствия. Ввиду демонстрационного характера модельных расчетов получена только одна (хотя и важнейшая) составляющая интегрального риска.

При условии наличия статистики о воздействии учитываемых внешних факторов в рамках рассматриваемой системы, например  $1/\text{год}^{\text{ix}}$  и значения ущерба, например  $U_{\text{Cr}} = 10^4$  МРОТ, полученные результаты (5.52) можно представить в принятой форме интегрального риска:

$$R_U^{\text{C3}} = 0,46/10^{-3} \text{ (МРОТ/год)}; R_U = 870/80 \text{ (МРОТ/год)}. \quad (5.53)$$

Таким образом, на примере конкретной системы вида «человек — жилой блок — опасные и вредные факторы — средства защиты» апробирован новый способ множественно-параметрического моделирования, а на его основе поставлена и решена задача оценки интегрального риска системы. По сравнению с известными способами, предлагаемый подход адаптирован к стандартным показателям (требованиям) безопасности, применяемым при проектировании, строительстве и эксплуатации потенциально опасных объектов, к стандартным видам факторов и характеристикам средств и мер защиты, к стандартным требованиям, задаваемым в технических условиях на объекты (системы) промышленного и социального назначения, а также к требованиям и показателям по чрезвычайным ситуациям.

## 5.5. Факторная параметрическая модель и методика возможностной оценки качества услуг населения Ростовской области

### 5.5.1. Описание исследуемой системы

Применительно к району (Ростовской области) рассматривается система сервиса вида «потребители услуг (ПУ) — пункты обслуживания (ПО) — классы и виды услуг». Под потребителями услуг понимается множество  $L = \{l\}$  платежеспособных людей (семьи, человека<sup>lxi</sup>), где переменная  $l$ , имеющая смысл номера отдельного потребителя, принимает значения от нуля до  $lL$ ,  $l = 0 \dots lL$ ,  $lL$  — количество платежеспособных

людей в районе. Множество пунктов обслуживания обозначается  $\mathbf{K} = \{k\}$ , где  $k$  — переменная, имеющая смысл номера пункта, принимает значения от нуля до  $kK$ ,  $k = 1 \dots kK$ ,  $kK$  — количество предприятий бытового обслуживания и участков сервиса в районе. Множество классов услуг в соответствии с ОКУН обозначим  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{N} = \{n\}$ ,  $n = 1 \dots nN$ ,  $nN = 17$  — количество классов (номеров) услуг. Множество номеров видов услуг в рамках одного класса обозначим  $\mathbf{M} = \{m\}$ ,  $m = 1 \dots mM$ ,  $mM$  — количество видов услуг. Под видами услуг, например, при сервисе радиоэлектронной техники (автосервисе) понимается гарантийное обслуживание или ремонт аппаратуры (автомобилей), а при обслуживании в парикмахерских — стрижка волос у мужчин, создание модели прически у женщин и т. д. Виды услуг в рамках стандартных классов услуг унифицированы. Поэтому введенные множества можно назвать *опорными* множествами для описания системы сервиса, а их совокупность назовем базисом опорных множеств (БОМ):

$$\mathbf{БОМ} = \{\mathbf{L}, \mathbf{K}, \mathbf{N}, \mathbf{M}\} = \{\{l\}, \{k\}, \{n\}, \{m\}\}. \quad (5.54)$$

Наличие либо отсутствие переменных в рассматриваемых множествах (5.54) удобно представлять позиционно с помощью булевых подмножеств «своих» множеств так, что:

$$\mathbf{OL} = \{ol\} \rightarrow \mathbf{L} = \{l\}, \quad (5.55)$$

где  $ol$  — позиционная булева переменная, для которой условие равенства единице  $ol = 1$  индицирует о наличии заявки от потребителя под номером  $l$ . Аналогично введены булевы подмножества  $\mathbf{OK}$ ,  $\mathbf{ON}$ ,  $\mathbf{OM}$ .

Декартово произведение булевых подмножеств

$$\mathbf{OL} \times \mathbf{OK} \times \mathbf{ON} \times \mathbf{OM} \quad (5.56)$$

описывает размерность базиса системы.

В общем случае принимается, что любой потребитель может неоднократно обращаться в любой пункт, который соответственно обладает возможностями реализации требуемых классов услуг. Однако учитывается, что при формировании заявки потребитель руководствуется пространственно-временными условиями (близостью ПО), стоимостными ограничениями и собственной информированностью о предполагаемом качестве услуг (мнением соседей). Указанные обстоятельства определяют задачу оценки качества услуг в рассматриваемой системе как задачу множественного факторного параметрического описания услуг и нахождения меры возможности удовлетворения потребителя при краевых условиях по стоимости и времени услуг, а также платежеспособности и информированности потребителей.



### 5.5.2. Факторная параметрическая модель услуг

Введем параметр качества услуги в виде оценки  $r$ , принимающей по пятибалльной шкале следующие значения: 1 — отсутствие такой услуги и соответственно 2 — «плохая», 3 — «удовлетворительная», 4 — «хорошая» и 5 — «отличная» услуга. Продолжительность и стоимость конкретной услуги соответственно обозначим параметрами  $\tau$  и  $c$ , области изменения которых выразим в виде интервалов:  $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ ;  $[c_{\min}, c_{\max}]$ , где для большинства услуг величины  $\tau_{\min}$  и  $c_{\min}$  представляют договорные или тарифные значения, а  $\tau_{\max}$  и  $c_{\max}$  — максимально допустимые величины.

Очевидно, что у потребителей полное удовлетворение наступает, если выполняется комплекс (пересечение) требований, выраженных в виде:

$$y = 1: (r = 5) \cap (\tau \leq \tau_{\min}) \cap (c \leq c_{\min}). \quad (5.57)$$

Тогда как полное неудовлетворение может наступить, если реализуется хотя бы одно из условий из объединения:

$$y = 0: (r = 1) \cup (\tau \geq \tau_{\max}) \cup (c \geq c_{\max}). \quad (5.58)$$

На основании рассмотренных выше множеств (5.54), (5.55) построим следующие множества параметров качества  $\mathbf{R}$ , продолжительностей  $\mathbf{T}$  и стоимостей  $\mathbf{C}$  услуг:

$$\mathbf{R} = (r_{m n k l}), \mathbf{T} = (\tau_{m n k l}), \mathbf{C} = (c_{m n k l}), \quad (5.59)$$

где, например, переменная  $r_{m n k l}$  обозначает оценку, данную  $l$  потребителем по  $m$  виду  $n$  класса услуги, произведенной на  $k$  пункте обслуживания.

Введем также булевы подмножества множеств (5.59) в виде:

$$\mathbf{OR} = (or_{m n k l}), \mathbf{OT} = (ot_{m n k l}), \mathbf{OC} = (oc_{m n k l}), \quad (5.60)$$

где соответственно  $or$ ,  $ot$  и  $oc$  — булевы переменные.

Булево подмножество (5.60), например подмножество  $\mathbf{OR}$ , назовем полным, если все его переменные равны 1 ( $or = 1$  для любого  $m, n, k, l$ ). Подмножество  $\mathbf{OR}$  назовем пустым, если все его переменные равны 0 ( $or = 0$  для любого  $m, n, k, l$ ):

$$\mathbf{OR} \equiv \mathbf{1}; \mathbf{OR} \equiv \mathbf{\emptyset}. \quad (5.61)$$

Полное множество  $\mathbf{OR} \equiv \mathbf{1}$  описывает условие присутствия всего  $\mathbf{L}$  множества потребителей на множестве  $\mathbf{K}$  пунктов обслуживания по множеству  $\mathbf{N}$  классов и  $\mathbf{M}$  видов услуг.

Пустое множество  $\mathbf{OR} \equiv \mathbf{\emptyset}$  описывает условие полного отсутствия услуг.

Условия (5.61) представляют часть крайних условий задачи.

Также введем множества:

$$LNM = L \times N \times M, KNM = K \times N \times M, KM = K \times M, \quad (5.62)$$

$$OLNM = OL \times ON \times OM, OKNM = OK \times ON \times OM, OKM = OK \times OM, \quad (5.63)$$

которые, соответственно, описывают потенциальную емкость или наличие спроса и размер или наличие предложенных услуг в конкретной системе (районе).

### 5.5.3. Параметрическая модель оценки качества отдельной услуги и возможностная мера удовлетворения потребителя

Для количественного описания меры удовлетворения потребителей используем аппарат теории возможностей [11, 13]. Очевидно, что параметры качества  $r$ ,  $\tau$  и  $c$  отдельной услуги могут быть получены потребителем интуитивно исходя из личного опыта, т. е. субъективно. При этом потребитель выступает в роли эксперта. Или эти параметры могут определяться с помощью средств измерения и контроля, т. е. инструментально. В обоих случаях информация о качестве услуг может являться *нечеткой*, а распределение их выполнения на требуемом интервале, как правило, неизвестно. Вследствие этого можно принять линейную аппроксимацию функций принадлежности на описанных в п. 2 областях изменения нечетких параметров  $r$ ,  $\tau$ ,  $c$ , представив эти функции в следующем виде:

$$\mu_r(r) = 0,25(r - 1), r = 1, 2, 3, 4, 5; \quad (5.64)$$

$$\mu_\tau(\tau) = 0,5(3\tau_{\min} - \tau), \tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}], \tau_{\max} = 3\tau_{\min}; \quad (5.65)$$

$$\mu_c(c) = 0,5(3c_{\min} - c), c \in [c_{\min}, c_{\max}], c_{\max} = 3c_{\min}, \quad (5.66)$$

где в формулах (5.65), (5.66) число 3 имеет смысл коэффициента и означает условно принятый в данной модели «допуск» в разбросе качества. Так уменьшение этого коэффициента означает ужесточение требований к качеству услуг, а увеличение — ослабление таких требований.

Как видно из (5.64)–(5.66), функция  $\mu_r(r)$  — возрастающая, тогда как функции  $\mu_\tau(\tau)$  и  $\mu_c(c)$  — убывающие. То есть принято, что оценка  $r = 5$  соответствует мере удовлетворения, равной 1, а выполнение услуги с продолжительностью и (или) стоимостью, превышающими максимально допустимые значения, характеризуется мерой удовлетворения, равной 0. В ряде случаев увеличение продолжительности услуг приветствуется потребителями (услуги бани, например) и это легко учесть путем введения двухстороннего поля допуска и модификацией области допустимых значений в формулах (5.65), (5.66).

В общем случае возможность мера  $\pi$  определяется по функции принадлежности параметров  $r$ ,  $\tau$  и  $c$ , зависимости (5.64)–(5.66), с учетом требуемых или иным образом заданных значений этих параметров, обозначаемых как  $r_1$ ,  $\tau_1$  и  $c_1$ :

$$\pi_r = \mu_r(r = r_1); \pi_\tau = \mu_\tau(\tau = \tau_1); \pi_c = \mu_c(c = c_1). \quad (5.67)$$

где  $\pi_r = 1$ , если  $r \geq r_1 = 5$ ;  $\pi_{\tau(c)} = 1$ , если  $\tau(c) \leq \tau_{\min}(c_{\min}) = \tau_1(c_1)$  и  $\pi_{\tau(c)} = 0$ , если  $\tau(c) \geq \tau_{\max}(c_{\max}) = \tau_1(c_1)$ .

Поскольку параметры качества, продолжительности и стоимости обслуживания считаются независимыми и равно значимыми, то общее качество одной (отдельно взятой) услуги определяется как **пересечение** этих параметров. Тогда возможность мера интегрального качества отдельной услуги есть **минимальное** значение из рассчитанных по формулам (5.67) значений

$$\pi^\Sigma = \min(\pi_r, \pi_\tau, \pi_c). \quad (5.68)$$

Например, при  $r_1 = 4$ ,  $\tau_1 = \tau_{cp}$  и  $c_1 = c_{cp}$ ,  $\pi^\Sigma = \min(\pi_r = 0,66, \pi_\tau = 0,5, \pi_c = 0,5) = 0,5$ .

При  $r_1 = 5$ ,  $\tau_1 = \tau_{\min}$  и  $c_1 = c_{\min}$ ,  $\pi^\Sigma = \min(\pi_r = 1, \pi_\tau = 1, \pi_c = 1) = 1$ .

При  $r_1 = 3$ ,  $\tau_1 = \tau_{cp}$  и  $c_1 = 3 c_{\min}$ ,  $\pi^\Sigma = \min(\pi_r = 0,33, \pi_\tau = 0,5, \pi_c = 0) = 0$ .

На основании зависимости (5.68) находят множество дифференциальных (по координатам  $m$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $l$ ) возможных мер качества реализации услуг в системе сервиса «потребители услуг (ПУ) — пункты обслуживания (ПО) — классы и виды услуг»:

$$\Pi = \{\pi_{mnkl}^\Sigma\}. \quad (5.69)$$

Используя множество (5.69), строят подмножества мер относительно одной или несколько взятых переменных (размерностей) множества и учитывают источники, потребителей и их связи, а также значимость отдельных видов параметров и классов услуг.

## Заключение

В данной работе представлена для изучения новая методология количественной возможностной (нечеткой) оценки свойств сложных систем, являющая собой синтез детерминированной и вероятностной методологий. В научном аспекте проект содержит систему моделей, методов, доказательств и понятий, предназначенную для обоснования новой методологии. В познавательном и прикладном плане изложение основных результатов работы прежде всего направлено на изучение вопросов подготовки и обоснования форм и требований к содержанию представления нечетких исходных данных, которые получают (могут быть получены) с приемлемыми затратами и погрешностью в ходе дальнейшего анализа конкретной системы. Апробация результатов работы заключается в демонстрации реализуемости разработанных методов, методик и программ расчета показателей безопасности (риска) по представленным в заданной форме исходным данным об интересующей системе. Показано, что процесс получения показателей безопасности (риска) связан с дополнительным и достаточно сложным инженерным анализом конкретной системы и представлен на конкретных примерах. Область применения данной работы связана с изучением и обоснованием безопасности (риска) систем вида «потенциально опасный объект — средства и мероприятия защиты — факторы окружающей среды — человек» на основе баланса показателей «эффективность — безопасность — стоимость». Кроме того, рассматриваемые модели и методы применимы на этапе обоснования и (или) задания технических требований к таким системам и стратегий применения их объектов, а также при проведении предварительной экспертизы с позиции обобщенного риска. По сравнению с методологией логико-вероятностного моделирования и оценки риска разработанная методология имеет следующие отличительные признаки и достоинства:

- 1) осуществимо установление явной зависимости параметрических и возможных (нечетких) показателей риска и, вследствие этого, облегчение управления развитием и применением технических и экологических систем с позиции обеспечения приемлемой безопасности;
- 2) применима для исследования уникальных систем, которые характеризуются как сложные многофакторные, причем число

анализируемых предпосылок и функций связности об опасности не ограничено;

- 3) достижимо установление качественного (класса безопасности) и количественного (возможностной меры происшествия) показателей риска;
- 4) достигается методическое устранение (минимизация) ошибки второго рода;
- 5) <sup>lxii</sup>универсальность метода

К имеющимся сложностям в реализации такого подхода можно отнести:

- 1) необходимость полного анализа всех компонентов системы, что требует большого объема подготовительных операций;
- 2) зависимость от субъективных оценок экспертов по области и характеру размытости нечетких параметров базиса системы;
- 3) неизбежность наличия ошибки первого рода, что обуславливает завышенную оценку значений риска.

В целом данная работа предназначена для научных работников, а также аспирантов и студентов, <sup>lxiii</sup>занимающихся в области экспертизы и оценки свойств сложных технических и экологических систем.

## Список литературы

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. В 6 т. / Под общ. ред. К. В. Фролова и Н. А. Махутова. Т. 1. М.: МГФ «Знание», 1998. 448 с.; Т. 2. Ч. 2. М.: МГФ «Знание», 2003. 624 с.
2. *Махутов Н. А.* Развитие и применение методов управления риском в задачах обеспечения техногенной безопасности и технического регулирования // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. М.: ВИНТИ. 2006. № 1. С. 35–50.
3. *Махутов Н. А.* Конструкционная прочность, ресурс, и техногенная безопасность: В 2 ч. Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1. 494 с.; Ч. 2. 610 с.
4. *Волик Б. Г.* О концепциях техногенной безопасности // Автоматика и Телемеханика. 1998. № 2.
5. *Порецкий П. С.* Решение общей задачи теории вероятностей при помощи математической логики. Труды Казанской секции физ.-мат. наук. Сер. 1. 1987. Т. 5. С. 112–118.
6. *Стрелецкий Н. С.* Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. М.: Стройиздат, 1967. 232 с.
7. *Поспелов Д. А.* Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1964. 508 с.
8. *Рябинин И. А., Черкесов Г. М.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 263 с.
9. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
10. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 422 с.
11. *Дюбуа Д., Прад А.* Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М.: Мир, 1989. 286 с.
12. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
13. *Золотухин В. Ф.* Фундаментальные числовые характеристики возможности, возможностного распределения и меры // Автоматика и Телемеханика. 2002. № 3. С. 152–159.
14. *Острейковский В. А., Сальников Н. Л.* Вероятностное прогнозирование работоспособности ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 316 с.

15. Антонов А. В. Об определении индивидуального ресурса изделий атомных станций // Надежность и контроль качества (НКК). 1996. № 9. С. 42.
16. Аронов И. З., Адлер Ю. П., Агеев Л. В. Обзор современных подходов к обеспечению качества и безопасности сложных систем на основе анализа видов последствий и критичности отказов // Надежность и контроль качества. 1996. № 11. С. 3–16.
17. Аронов И. З. Современные проблемы безопасности технических систем и анализа риска // Стандарты и качество. 1998. 3. С. 45–51.
18. Ахлюстин В. Н., Новиков Г. А., Щукин Г. А. О возможном подходе к прогнозированию аварии в сложных технических системах // Безопасность труда в промышленности. 1992. № 3. С. 28–33.
19. Белов П. Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности. М.: ГНТП «Безопасность»; МИБ СТС, 1996. 428 с.
20. Боков В. А., Беляев В. И. Проблема «качества». Уроки нештатных ситуаций // Стандарты и качество. 1996. № 11. С. 31–36.
21. Борисов А. Н., Крумберг О. Л., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Рига.: Зинатне, 1990. 132 с.
22. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. М.: Стройиздат, 1965. 290 с.
23. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 410 с.
24. Булычев Ю. Г. Общая теория опорно-параметрических методов приближенного решения линейных операторных уравнений // Ж. вычисл. м. и мат. физ. 1996. Т. 36, № 10. С. 236–243.
25. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
26. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Физ. мат. изд-во, 1962. 564 с.
27. Волков Е. Б., Судаков Р. С., Сырицин Г. А. Основы теории надежности ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1974. 305 с.
28. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. М.: Высш. шк., 1976. 478 с.
29. Горбатов В. А. Основы дискретной математики. М.: Высш. шк., 1986. 310 с.
30. Гаенко В. П. Методологические аспекты теории безопасности сложных систем. СПб.: НИЦ БТС, 2004. 194 с.
31. ГОСТ 26.392-84. Безопасность ядерная. Термины и определения. ГОСТ Р22.0.06.(0.07)-97. Безопасность ЧС. Источники природных (техногенных) ЧС. Классификация и номенклатура и их параметры.
32. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов РД 03-418-01. Вып. 10. Серия 03: Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной

безопасности и охраны недр. М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2002. 38 с.

33. Об опыте декларирования промышленной безопасности и развития методов оценки риска опасных производственных объектов: Материалы тематического семинара / Под общ. ред. В. И. Сидорова. М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003. 96 с.

34. Дружинин Г. В. О показателях риска при функционировании технологических систем // Надежность и контроль качества. 1997. № 3. С. 41–46.

35. Есипов Ю. В. Техническая диагностика сложных объектов. Ч. 1: Методы технического диагностирования. Пермь: МО СССР, 1990. 126 с.

36. Есипов Ю. В., Васильченко Ю. И. Модель отказов «прочность — нагрузка» при перекрывающихся в распределениях параметров<sup>lxiv</sup> в условии их одностороннего допуска (статистический подход) // Надежность и контроль качества. 1994. № 3. С. 7–13.

37. Есипов Ю. В., Васильченко Ю. И. Оптимальное распознавание состояний статистически неопределенных объектов на основе вероятностной модели «воздействия — несущая способность» (гипотетический подход) // Надежность и контроль качества. 1995. № 12. С. 46–53.

38. Есипов Ю. В., Лапсарь А. П. Разработка метода системного анализа потенциальной опасности комплекса «технический объект — нерегламентированные факторы окружающей среды» // Надежность и контроль качества. 1997. № 11. С. 48–56.

39. Есипов Ю. В. Возможностная оценка отказов в нечеткой системе «факторы — объект» // Автоматика и вычислительная техника. 2002. № 1. С. 14–23.

40. Есипов Ю. В. Постановка и пути решения проблемы оценки риска сложных технических систем // Управление риском. 2002. № 3. С. 24–28.

41. Есипов Ю. В. Концепция возможностной оценки риска техногенных систем // Автоматика и Телемеханика. 2003. № 7. С. 5–12.

42. Есипов Ю. В. Моделирование опасностей и установление меры определенности происхождения в системе // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 3. С. 112–117.


43. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / Пер с фр. В. Б. Кузмина; Под ред. С. И. Травкина. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.

44. Концепция национальной системы стандартизации. Постановление Коллегии Госстандарта от 11.06.1998 г. // Стандарты и Качество. 1999. № 9. С. 91.

45. Коваленко И. Н., Кузнецов Н. Ю. Методы расчета высоконадежных систем. М.: Радио и связь, 1998. 186 с.

46. Канур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. 290 с.



47. Мелихов А. Н., Бернштейн А. С., Коровин С. Я. Ситуационные со-  
ветующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
48. Можжев А. С. Автоматизированное структурно-логическое моде-  
лирование в решении задач вероятностного анализа безопасности // **ТИТ**  
**МБСС**<sup>lxvi</sup>. Вып. 4. СПб., 1994. С. 16–38.
49. вский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой ис-  
ходной информации. М.: Наука, 1981. 231 с.
50. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений /  
А. Н. Борисов, А. В. Алексеев и др. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.
51. Райнишке К., Ушаков И. А. Оценка надежности систем с использо-  
ванием графов. М.: Радио и связь, 1988.
52. Риски: анализ и управление: Сборник научных трудов / Под ред.  
А. А. Быкова, Р. Т. Юлдашева. Вып. 1. М.: Анкил, 1999. 120 с.
53. Седов Л. Н. Теория подобия и размерностей в механике. М.: Нау-  
ка, 1987. 432 с.
54. Савельев Л. Я. Комбинаторика и вероятность. Новосибирск.: Нау-  
ка, СО, 1975. 420 с.
55. Успенский В. А., Семенов А. Л. Теория алгоритмов: основные от-  
крытия и приложения. М.: Наука, 1987. 288 с.
56. Цапенко Н. П. Измерительные информационные системы. М.:  
Энергоатомиздат, 1985. 440 с.
57. Чечеров К. П. Успешный эксперимент, закончившийся катастро-  
фой // Техника молодежи. 1997. № 9. С 2–4; № 10. С. 2–7.
58. Электрические измерения неэлектрических величин. М.: Высш.  
шк., 1975. 456 с.
59. Элементы теории испытаний и контроля механических систем /  
Под ред. Р. М. Юсупова. М.: Энергия, 1978. 178 с.
60. Быков А. А., Мурзин Н. В. Проблемы анализа безопасности чело-  
века, общества и природы. СПб.: Наука, 1997. 247 с.
61. Сафонов В. С., Одишария Г. Э., Швыряев А. А.. Теория и практика  
анализа риска в газовой промышленности. М.: НУМЦ Минприроды Рос-  
сии, 1996. 208 с.
62. Теория и информационная технология моделирования безопасно-  
сти сложных систем / Под ред. И. А. Рябина и Е. Д. Соложенцева. СПб.:  
ИПМАШ РАН, 1994–1995. 400 с.
63. Хенли Э. Дж., Кумamoto Х. Надежность технических систем и  
оценка риска: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1984.
64. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. N-Y. 8, 338–  
353.
65. Kafka P. Probabilistic Safety assessment (PSA) technology — how it  
works, what does it do, where are the gaps // Safety and reliability assessment –  
an Integral Approach (Proceedings of the European Safety and reliability Con-

ference, Munich, Germany, May 10 th – 12 th 1993). Amsterdam; New York; Tokyo: Elsevier, 1993. P. 303–403.

66. *Stamenkovic B., Holovac S.* Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA): The basic concepts and Application // Logistics Engineering. 1987.

67. СТП «Методика автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности проектируемых объектов». СПб.: СПИК СЗМА, 2002. 15 с.

68. *Можжаев А. С., Гладкова И. А.* Программный комплекс Автоматизированного Структурно-Логического Моделирования и Расчета Надежности и Безопасности «ПК АСМ СЗМА» для вероятностного анализа надежности и безопасности структурно-сложных систем. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2003611099; 2003611100; 2003611101, зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ 12.05.2003 г.

69. *Aven T.* Reliability and Risk Analysis. N-Y.: Elsevier Applied Science, 1992.

70. *Губанов В. А., Захаров В. В., Коваленко А. И.* Введение в системный анализ. Л.: ЛГУ, 1988. 240 с.

71. *Декабрун И. Е.* Теоретические аспекты физики отказов. Физика отказов. М.: Наука, 1981. 162 с.

72. *Трефилов В. А.* Теоретические основы безопасности человека. Пермь.: ПГТУ, 2005. 126 с.

73. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие в 5 кн. Кн. 2. / <sup>lxviii</sup> *В. А. Котляревский, А. В. Виноградов.* М.: Изд-во Ассоциации строит. ВУЗов, 1998. 384 с.

74. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учебное пособие в 5 кн. Кн. 5. / *Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева.* М.: Изд-во Ассоциации строит. ВУЗов, 2001. 416 с.

75. *Есипов Ю. В.* Возможностная оценка риска систем вида «чрезвычайные факторы – потенциально опасный объект — средства и мероприятия защиты — человек» // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. № 2. М.: ВИНТИ, 2004. С. 66–73.

76. *Есипов Ю. В., Черемисин А. И.* Информационная технология возможностного моделирования и экологического мониторинга пространственно-разнесенных систем // Альтернативные естественно возобновляющиеся источники энергии и энергосберегающие технологии, экологическая безопасность регионов. Выездная сессия РАН. Ч. 2. Ессентуки, 2005. С. 38–39.

77. *Есипов Ю. В., Мельник Д. Я., Черемисин А. И.* Разработка автоматизированной системы оценки, мониторинга и управления риском и качеством техногенных и экологических систем // Труды Международной научной школы «Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах (МА БР-2005), 28 июня – 1 июля, 2005». СПб., 2005.

78. Есипов Ю. В., Самсонов Ф. А., Черемисин А. И. Методика и программный продукт «ВОЗМЕР-2.2» для расчета дифференциальных и интегральных показателей риска // Труды Международной научной школы «Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах (МА БР-2005), 28 июня – 1 июля, 2005». СПб., 2005.

79. Есипов Ю. В., Самсонов Ф. А., Черемисин А. И. Факторная параметрическая модель и методика возможностной оценки качества и прибыльности сервиса и услуг // Труды Международной научной школы «Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах (МА БР-2005), 28 июня – 1 июля, 2005». СПб., 2005.

80. Есипов Ю. В., Акопьян В. А., Мухомтов В. М., Герасимов В. Л. Возможностная оценка риска в ходе мониторинга и анализа динамических деформационных образов конструкций // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2006. № 3.

81. Есипов Ю. В. Безопасность жизнедеятельности: Учебно-методическое пособие для студентов всех специальностей Ростовского института сервиса Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса. Ч. 1, 2. Ростов н/Д., 2004. 168 с.

82. Есипов Ю. В., Самсонов Ф. А., Рябоконь Д. Н. Методика и программный продукт «Возмер». Ростов н/Д.: РВИ РВ, 2001 (В рамках КНИР «Безопасность-99»). Инв. 31/33.

83. Самсонов Ф. А. Методика построения имитационного тренажерного комплекса на базе ПЭВМ для подготовки операторов технических систем // Научная мысль Кавказа. 2005. № 4. С. 114–121.

84. Farrar C. R., Hemez F. M., Shunk D. D., Stinemat D. W., Nadler B. R., Czarnecki J. J. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. Los Alamos National Laboratory Report. LA-13976-MS. 2004.

85. Методология частично упорядоченного моделирования и информационная технология возможностной (нечеткой) оценки риска сложных систем: Отчет по гранту РФФИ № 04-07-90084 / Рук. пр. Ю. В. Есипов. Ростов н/Д.: РИС ЮРГУЭС, 2005. Инв. 3/ЗИТС.

86. Программный продукт «ВОЗМЕР 2.2» для расчета показателей риска сложных систем; Свидетельство регистрации программы для ЭВМ № 2006613133; электронная библиотека «Теоретические и методологические аспекты моделирования и возможностной оценки нечетких систем» (<http://www.rostincerv.ru/наука>).

87. Присняков В. Ф., Приснякова Л. М. Математическое моделирование переработки информации оператором человека-машинных систем. М: Машиностроение, 1990. 248 с.

88. Цибулевский И. Е. Ошибочные реакции человека-оператора. М: Советское радио, 1979. 206 с.



- 
- i нужны заглавн. буквы? Тогда сделать во всех расшифровках?
  - ii каждое сокр. с новой строки?
  - iii булев? проверьте всюду
  - iv PSA-технология?
  - v потенциально опасных элементов
  - vi стиль
  - vii где 2?
  - viii Ссылка перенесена
  - ix верно?
  - x Есть ли подпись к рисунку?
  - xi [12–14, 23]?
  - xii проверьте внесенную правку в рис. и подпись из ориг. (распечатки)
  - xiii Есть ли подпись к рисунку?
  - xiv убрать слово?
  - xv эпиграфы к разд. переставить после заголовка раздела
  - xvi подпись к рисунку?
  - xvii Проверьте, на рис. нет
  - xviii Убрать?
  - xix  $l$  источников или  $l$ -го источника?
  - xx Верно?
  - xxi  $R'_U$ ?
  - xxii способных образоваться?
  - xxiii подпись к рисунку?
  - xxiv изображенного на
  - xxv Тире?
  - xxvi Главным?
  - xxvii направленной?
  - xxviii  $G > 0$ ?
  - xxix Где?
  - xxx подписи к рисункам?
  - xxxi Изменен порядок слов
  - xxxii На рис.  $s$ ,  $h$ ,  $b$  — как правильно?
  - xxxiii повтор?
  - xxxiv П курсивом (как в условн. обозн.)?
  - xxxv  $O$  или  $0$ ?
  - xxxvi  $\pi'$  или  $\pi$  факториал? и на рис. 3.7  $\Pi$  и  $\Lambda$  или  $\pi$  и  $\lambda$ ?
  - xxxvii их?
  - xxxviii На рисунках  $\mu^{(\Lambda)}$  и  $\mu^{(H)}$
  - xxxix Проверьте рис., нужны черточки сверху и снизу букв?
  - xl проверьте всюду  $zb$  или  $ZB$ ?
  - xli 3.1?

- 
- xl<sup>ii</sup> Верно?  
xl<sup>iii</sup> сбора  
xl<sup>iv</sup> ГОСТа или ГОСТов?  
xl<sup>v</sup> в системе?  
xl<sup>vi</sup> где «с другой стороны»?  
xl<sup>vii</sup> К главе? Сделать заголовком?  
xl<sup>viii</sup> выделено в отд. строку  
xl<sup>ix</sup> 4 м?  
l не хватает закр. скобки  
li , полученные ?  
lii **2.2 ?**  
liii заголовок?  
liv проверьте формулы  
lv Это те рисунки? подписи к рис.?  
lvi теплостойкость?  
lvii проверьте формулу  
lviii Верно?  
lix повтор  
lx за год?  
lxi непонятно  
lxii стиль (пункты грамматич. не согласуются)  
lxiii лучше: занимающихся экспертизой и оценкой свойств...  
lxiv Верно?  
lxv Уточните год  
lxvi Это изд-во?  
lxvii Под ред. ?