

ЧАСТЬ II
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ПРОИСШЕСТВИЙ В ТЕХНОСФЕРЕ

ГЛАВА 4
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ

Общие принципы системного анализа и моделирования сложных процессов позволяют перейти к изучению тех их особенностей, которые свойственны появлению происшествий в техносфере. Именно этому и посвящен материал второй части книги, где соответствующие опасные процессы моделируются с помощью диаграмм причинно-следственных связей типа «дерево», «граф» и «сеть».

Содержание данной главы связано с конкретизацией процесса системного исследования опасных процессов путем их формализованного представления вначале в виде семантических диаграмм причинно-следственных связей, а затем и с помощью основанных на них знаковых (математических) моделей и машинных алгоритмов. *Цель* изучения этого материала связана с подготовкой читателя как к моделированию техносферных происшествий и системному анализу полученных при этом результатов, так и к оценке эффективности системных рекомендаций по повышению безопасности в техносфере.

4.1. Сущность системного подхода к исследованию процессов в техносфере

Рассмотрение методов системного исследования интересующих нас процессов в техносфере с целью уяснения закономерностей появления и предупреждения, возможных там происшествий удобно начать с анализа накопленного опыта исследования сложных систем. Уточнение данных принципов, как и других, ранее принятых концептуальных положений, соответствует общепринятой научной парадигме, поскольку «нельзя добиться ясности в рассуждениях, не внося ее предварительно в определения». Следуя этому требованию, еще раз подчеркнем особенности современных технологических процессов и лишь после этого изложим особенности реализации на практике ранее выбранного основного научного метода исследования.

Современная производственная деятельность проявляется, как уже ранее указывалось, в использовании человеком «машины» и существовании связанной с этим опасности (возможности причинения ущерба)" в том числе и для его здоровья. Поведение людей и техники при работе во многом зависит от выбранной технологии и условий рабочей среды. Последняя, в свою очередь, может изменяться в результате воздействия на нее со стороны двух первых компонентов исследуемой системы, а степень такого изменения определяется принятой технологией и установленной организацией работ.

Вот почему отклонения в работе технологического оборудования, вызванные Конструктивными (производственными) дефектами или вредными воздействиями на него извне, необходимо учитывать и компенсировать эксплуатирующему его

персоналу. Для облегчения этого используемое оборудование должно быть надежным и эргономичным, т. е. приспособленным к человеку и рабочей среде.

Однако довольно часто приходится приспосабливать к технике сам персонал - за счет соответствующего отбора, обучения и воспитания. Если уже взаимное приспособление людей и используемого ими оборудования не гарантирует предупреждения происшествий, то выход ищут в дополнительных организационно-технических мероприятиях по обеспечению безопасности их совместного функционирования.

Приведенные данные еще раз подтверждают необходимость представления исследуемого объекта как сложной человеко-машинной системы. Отсюда следует фактическая невозможность рассмотрения безопасности в крупных процессах в целом и вытекающая из этого целесообразность их декомпозиции до отдельных производственных или технологических операций. Такая декомпозиция позволяет отказаться от макроуровневого рассмотрения исследуемого объекта (многочеловекомашинных систем) и заменить его микроуровневым, а взаимное влияние отдельных операций (моносистем «человек-машина-среда») учесть с помощью дополнительных взаимосвязей.

Однако даже такое представление рассматриваемого объекта, значительно упрощающее его исследование, не отрицает системного подхода, а, наоборот, делает его применение более конструктивным.

Действительно, представленная ранее модель человеко-машинной системы (см. рис. 3.6) подтверждает ее сложность и необходимость признания качественно новым образованием по сравнению с отдельными компонентами и даже их суммой. Все это позволяет лучше понять и предопределенность природы этих компонентов, и невозможность их познания вне системы, т. е. без учета всех взаимосвязей и взаимозависимостей.

Помимо согласия между логикой поведения исследуемого объекта и только что изложенными двумя принципами общей теории систем, можно продемонстрировать и соответствие выявленных ранее (см. разд. 3.2) закономерностей появления происшествий рассмотренным выше (см. разд. 1.2) принципам системной динамики. Напомним, что некоторые из них указывают на значимость структуры обратных связей в системе для ее поведения и обусловленных этим проблем. В нашем случае это проявилось, например, в образовании причинных цепей предпосылок, которые вызваны внутрисистемными факторами, в том числе и показанными на рис. 3.4.

Изложенные соображения свидетельствуют о перспективности выбранного здесь основного метода для системного анализа и моделирования безопасности. Действительно, системная инженерия учитывает весь положительный опыт в области изучения сложных систем, базируется на соответствующих принципах их общей теории и динамики. Из этих принципов следует, в частности, что целенаправленность поведения таких систем проявляется в стремлении к сохранению неизменности на дискретных интервалах времени, обусловленной внутренними причинами, включая приспособительную реакцию к внешним воздействующим факторам.

Из кибернетики системная инженерия позаимствовала оперирование

понятиями «черный ящик», «положительная и отрицательная обратная связи», «задержка», «возмущение и устойчивость»; из синергетики - «бифуркация и катастрофы» (внезапные резкие изменения состояния системы). Применительно к рассматриваемым здесь опасным техносферным процессам неустойчивость в поведении человеко-машинной системы может интерпретироваться, например, как появление предпосылок к происшествиям, вызванных возмущающими факторами, тогда как возникновение происшествий - как превышение этих факторов над ее адаптивными возможностями или запаздыванием с реакцией на них.

Процедура исследования интересующих нас процессов в человеко-машинных системах методом системной инженерии в основном совпадает с уже упомянутой выше (см. разд. 1.3) формулой трехэтапного познания и преобразования действительности: «созерцание-мышление-практика». Однако здесь она должна быть более специфичной и конкретной, поскольку касается только методов системного анализа и моделирования техногенных происшествий.

Вот почему далее будем придерживаться более привычной последовательности исследования связанных с ними процессов, выраженной следующей трехэтапной комбинацией: а) эмпирический системный анализ; б) проблемно ориентированное описание; в) теоретический системный анализ.

Совокупность только что указанных этапов с их элементами и взаимосвязями может рассматриваться как структура системного анализа и моделирования процессов в техносфере, основанная Преимущественно на применении гибкой системной методологии прогнозирования и перераспределения техногенного риска. Данная структура представлена на рис. 4.1. До того как приступить к ее подробному рассмотрению, заметим, что содержащиеся там этапы олицетворяют первые пять шагов описанной ранее (см. разд. 1.3) обобщенной процедуры, а основное внимание при этом акцентируется на процессы повышенной опасности.

Самым первым и *довольно* важным этапом системного исследования техносферы считается эмпирический системный *анализ* рассматриваемых там проблемных ситуаций с обеспечением безопасности техносферы. Он основывается на изучении требований и сборе статистических данных *по* аварийности и травматизму, выявлении несоответствий между желаемым и действительным состояниями исследуемых опасных процессов, определении состава существенных факторов - тех свойств человеко-машинной системы, которые наиболее часто фигурируют в анализируемых данных.

В процессе осуществления рассматриваемого этапа широко используются различные способы сбора и преобразования статистических данных, направленные на повышение информативности изучаемых признаков или снижение их размерности. Наиболее предпочтительны для этого следующие: проверка статистических гипотез, регрессионные алгоритмы, дискриминантный и факторный анализы, кластер-процедуры.

Важность данного этапа состоит в его значимости для последующих рассуждений: в случае недобросовестности проведения эмпирического системного анализа возможны так называемые ошибки третьего рода - неверные выводы при ошибочных исходных предположениях. И наоборот, качественное

проведение сбора и обработки статистических данных обеспечивает адекватность отображения реальности, необходимую для дальнейшего моделирования, поскольку любые эмпирические данные - следствие объективно существующих законов природы и общества.

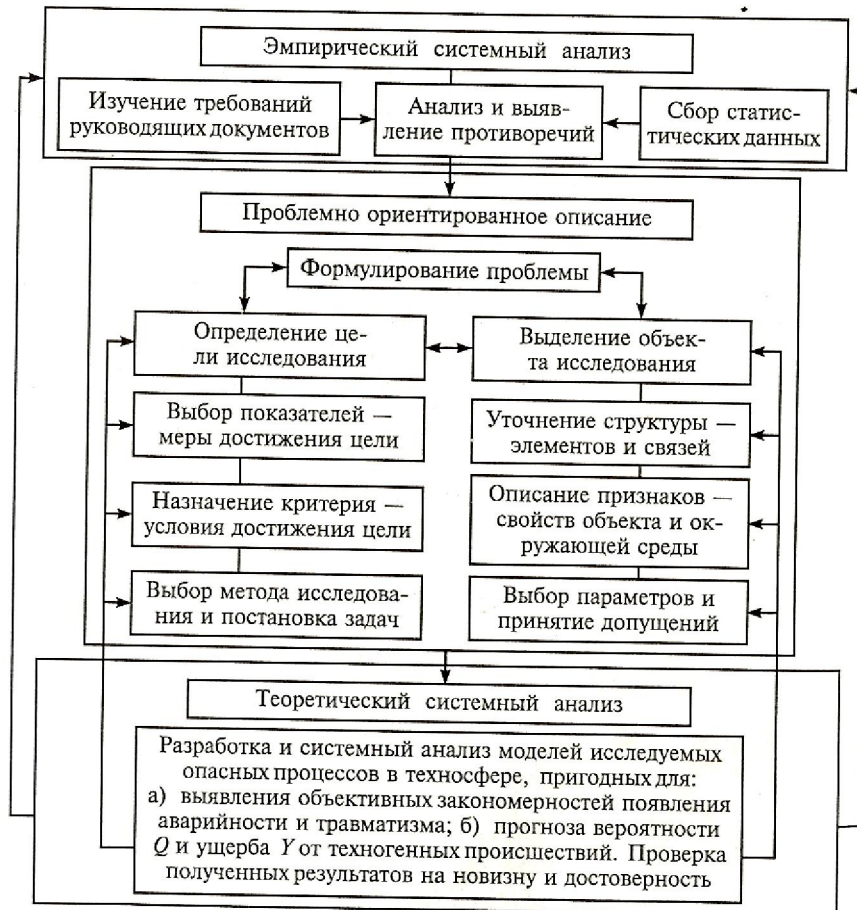


Рис. 4.1. Структура системного исследования безопасности в техносфере

Следующим (после эмпирического системного анализа) этапом служит, как это показано на рис. 4.1, проблемно-ориентированное описание объекта и цели моделирования - тех опасных техносферных процессов, которые могут сопровождаться появлением происшествий, а также выявление соответствующих закономерностей и оценка их параметров. Этот этап обычно включает более четкое формулирование проблемной ситуации, идентификацию связанной с ней человеко-машинной системы, уточнение характера ее взаимодействия с внешней средой, определение цели предстоящего моделирования и системного анализа, выбор соответствующих показателей и критериев.

При этом подразумевается следующее:

- а) выявление сущности противоречий - породивших факторов, а также организаций или лиц, заинтересованных в их ликвидации;
- б) уточнение цели моделирования - определение необходимых для этого изменений, соответствующих методов, показателей и критериев;
- в) идентификация объекта - уточнение структуры, свойств и характера взаимодействия его элементов, определение учитываемых и игнорируемых

факторов, а также параметров тех из них, которые наиболее существенны для появления и устранения происшествий.

Завершающий этап системного анализа и моделирования конкретных процессов в техносфере связан с проведением их теоретического системного анализа. Такое исследование должно быть направлено на уточнение представлений об условиях возникновения и предупреждения происшествий при функционировании человеко-машинных систем. Основой для выявления подобных условий и использования соответствующих факторов могут служить указанные выше (см. разд. 2.2) принципы и закономерности поведения сложных систем, а также результаты, полученные при проведении эмпирического системного анализа аварийности и травматизма в техносфере.

Особое место при проведении теоретического системного анализа техносферы принадлежит моделированию процессов, связанных с возникновением там происшествий. Это обусловлено, прежде всего, неприемлемостью по этическим и экономическим соображениям экспериментального изучения тех аспектов, которые касаются жизни и здоровья людей, значительного ущерба материальным ценностям и природным ресурсам. В этих условиях только моделирование позволяет заблаговременно пополнить представления об условиях, закономерностях возникновения и предупреждения техногенных происшествий, компенсировать дефицит в соответствующих статистических данных.

Важным условием успешного завершения теоретического системного анализа опасных техносферных процессов является выявление объективных закономерностей возникновения техногенных происшествий и априорная оценка соответствующего риска. Подобный прогноз предполагает разработку моделей, пригодных для количественной оценки: а) вероятности появления конкретных происшествий - $Q(\tau)$; б) величины соответствующего ущерба от них людским, материальным и природным ресурсам - $Y(\tau)$.

Что касается окончания всей, представленной на рис. 4.1, процедуры, то она должна завершаться проверкой полученных на каждой ее итерации результатов на новизну и достоверность. Необходимость и особенности такой проверки проиллюстрированы там текстом и линиями со стрелками, указывающими на сведения, нуждающиеся в дополнительном контроле. При этом также предполагается, что проведение всей процедуры системного анализа и моделирования процессов техносферы должно осуществляться непрерывно, с периодическим информированием должностных лиц системы обеспечения ее безопасности.

Перед тем как более подробно обосновать особенности формализации и моделирования, исследуемых в техносфере категорий, рассмотрим один из способов представления информации, основанный на применении нечетких множеств и теории возможностей, покажем их связь с более привычными нам понятиями. Напомним, что необходимость в таком подходе указывалась ранее (см. разд. 1.2), где отмечалось, что предметом соответствующей теории служат объекты с плохо определенными (нечеткими, размытыми) границами, а важными категориями - лингвистические переменные, другие нечеткие величины и функции их принадлежности - $\pi(X)$.

Уточним, что лингвистические, т. е. вербальные или словесные, переменные используются для характеристики таких предметов или их свойств, для которых переход от принадлежности к какому-то классу к непринадлежности наблюдается не скачкообразно, а непрерывно. Примерами же лингвистических переменных являются следующие слова или высказывания на естественном человеку языке: «хорошая погода», «красивая машина», «удобное рабочее место», а нечеткими числами - числительное в выражениях «сорокалетний мужчина», «стотонный автомобиль» и т. п.

Функции же принадлежности лингвистических переменных представляют собой множества, количественно выражающие степень субъективного доверия к приведенным выше и другим им подобным высказываниям или совместимость их с более точными (количественными) признаками. Пример одной из таких функций для утверждения «молодой человек» (в смысле возраста) показан на рис. 4.2 - графиком и аналитическим выражением. Более подробное знакомство с рассмотренными здесь категориями удобно сделать, обратившись, например, к работе [16].

Можно показать определенную связь между отдельными понятиями теории возможностей и теории вероятностей, а также провести некоторые аналогии между ними. Так, понятие «возможность» обычно указывает на меру субъективной уверенности и рассматривается иногда как согласованное распределение уверенности - по Т. Байесу. Напротив, категория «вероятность» считается объективной мерой появления случайных событий, а ее значения могут быть статистически или экспериментально подтверждены.

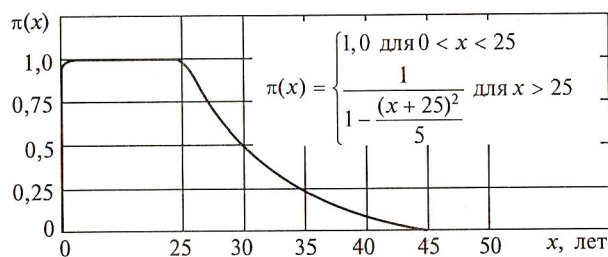


Рис. 4.2. Способы задания функции принадлежности

Однако некоторые различия между понятиями теории возможностей и теории вероятностей не исключают выбора таких функций принадлежности, при которых маловероятное имеет и малую степень возможности появления. Это связано с тем, что Функция принадлежности, например, может интерпретироваться в отдельных случаях как плотность вероятности случайной величины.

Просматривается определенная аналогия между некоторыми числовыми характеристиками рассмотренных распределений, например, между наибольшим значением лингвистической переменной или модальным значением нечеткого числа и модой случайной величины. Приведенные и другие числовые характеристики могут иногда рассматриваться как квантили тех их значений, которые соответствуют наиболее возможной и наиболее вероятной величинам рассматриваемых переменных.

Нетрудно видеть плодотворность использования указанного выше подхода к представлению данных при решении ряда практически важных задач системного анализа и синтеза безопасности, допустим, для формализации нечетко определенных свойств человеко-машинных систем, более корректного описания самих категорий «опасность», «безопасность» и определения их количественных характеристик. Некоторые из этих подходов будут проиллюстрированы ниже, а пока обратимся к рассмотрению основных принципов формализации и моделирования рассматриваемых здесь процессов.

4.2. Особенности формализации и моделирования опасных процессов

Прежде всего, уточним, что под *формализацией* в последующем будет подразумеваться упорядоченное и специальным образом организованное представление исследуемых здесь человеко-машинных систем, их компонентов и процессов в техносфере. Напомним также, что под моделированием ранее условились понимать использование созданных в результате формализации искусственных образований (моделей), имеющих идентичные оригиналу характеристики, в целях получения новых данных или знаний о нем. При этом такие сведения могут быть найдены в процессе качественного и количественного анализа исследованных моделей.

Выбор необходимых способов формализации и моделирования конкретных категорий определяется обычно природой объекта или процесса, целью их изучения и вытекающими из этого специфическими требованиями к языкам представления данных и описанию моделей. Учитывая разнообразие известных ныне методов формализации и моделирования, обоснуем требования к их выбору и укажем на особенности реализации таких методов для системного исследования интересующих нас процессов в техносфере.

Основная особенность формализации и моделирования процесса возникновения происшествий в техносфере вообще и в человеко-машинных системах в частности состоит в представлении первого в виде событий и активностей (работ), а вторых - в виде совокупности элементов и связей между ними. В свою очередь, состояние каждой такой моделируемой категории описывается путем введения соответствующих переменных параметров, а также образуемых ими векторов и пространств, а процесс взаимодействия (функционирования) - изменением траектории в пространстве соответствующих состояния или изображением логически связанных наборов событий и активностей.

При формализации и моделировании обычно придерживаются ряда правил, главные из которых состоят в обеспечении необходимой информационной достаточности и рационального использования фазового пространства. Из последних утверждений вытекает область применения формализации и моделирования. Эти методы невозможны или малоэффективны при отсутствии некоторого минимума существенной информации об исследуемых категориях и мало перспективны - в условиях ее полной определенности или возможности экспериментального получения.

При прогнозировании уровня потенциальной опасности техносферы наиболее

часто формализуются и моделируются процессы возникновения и предупреждения аварийности и травматизма. Однако, помимо данных процессов, иногда используется формализованное изображение самих человеко-машинных систем, условий обеспечения безопасности их функционирования или решения других стоящих перед ними задач. Считается, что формальная модель объекта исследования задана, если определены цель и процедура его анализа, показатели и механизм коррекции функционирования, ограничения и взаимосвязи с окружением.

Опыт исследования свидетельствует, что моделирование и формализация процессов в техносфере должны сопровождаться некоторым упрощением соответствующих объектов (человеко-машинных систем) за счет их отделения от других объектов и окружающей среды, а также исключения несущественных, по мнению исследователя, связей. При формализации и моделировании техногенных происшествий, необходимо также руководствоваться определенными требованиями, основная идея которых заключается в стремлении к оптимальной структуре используемых моделей, обеспечивающей их проблемно-ориентированную полноту, приемлемую точность, удобство и гибкость применения.

Основными из встречающихся при формализации и моделировании *недостатками* как раз и являются те, которые обусловлены неудачно выбранной (излишне усложненной или слишком упрощенной) структурой используемых моделей. Очень подробная детализация исследуемого техносферного процесса или объекта может проявиться в громоздкости модели и связан он с этим возможности «не увидеть за деревьями леса», а также в необеспеченности ее исходными данными и большой трудоемкости работ по подготовке и использованию подобной модели.

В то же время слишком упрощенное представление формальной модели процесса возникновения происшествия будет сопровождаться потерей требуемой точности его описания и анализа, а также появлением обусловленного этим риска «выплеснуть вместе с водой и ребенка». Другие трудности при формализации и моделировании аварийности и травматизма в техносфере могут быть вызваны отсутствием необходимых исходных данных либо неудачным выбором самого метода моделирования.

Среди известных к данному времени методов формализации и моделирования наиболее оправданным для системного исследования опасных процессов в техносфере является применение нематериальных (физических или аналоговых) моделей, а идеальных - смысловых, знаковых и интуитивных. Первые попытки моделирования в этой области были связаны с применением экспертных оценок, полученных на основе различных интуитивных моделей - мысленных экспериментов и сценариев. После обнаружения несостоятельности использования одних лишь моделей этого типа и разработки методов математического и машинного моделирования широкое распространение получили семантические и семиотические модели - логико-вероятностные, графоаналитические и алгоритмические.

Что касается общей *последовательности* особенностей реализации

перечисленных методов, то можно рекомендовать следующее.

Прежде всего, при исследовании процесса возникновения техногенных происшествий следует одновременно использовать все перечисленные выше идеальные модели. При этом начинать целесообразно с разработки концептуальных моделей, в которых на интуитивном уровне определять метасистему - в нашем случае всю техносферу или конкретный производственный объект, а затем уже вычленять из них конкретную человеко-машинную систему или систему обеспечения безопасности ее функционирования.

В последующем выбранная метасистема должна использоваться как внешнее дополнение к рассматриваемому объекту, делающее его формализуемым и открытым для естественного взаимодействия с выбранным окружением. После определения на самом общем (концептуальном) уровне контуров предполагаемого объекта исследования, его инфраструктуры, ближнего окружения и характера их взаимодействия можно перейти к следующему, более детальному уровню формализации и моделирования конкретной человеко-машинной системы. При этом рекомендуется пользоваться общесистемными принципами (см. разд. 1.2) и исходить из примерно такой *очередности*.

Вначале следует руководствоваться имеющимися представлениями или гипотезами о поведении, функциях и свойствах этой системы, на основе которых определять ее организацию и состав впоследствии, по мере уточнения структуры и порядка функционирования исследуемого объекта, эти сведения можно использовать для корректировки представлений о его реальных свойствах, функциях и поведении. На практике такая последовательность должна повторяться многократно, но с обязательным соблюдением рекомендуемой очередности: сверху - вниз, от обобщенного уровня - к детальному и обратно.

При системном исследовании конкретных фрагментов техносферы наибольшую перспективность имеют не модели. Условий обеспечения их безопасности вообще или в конкретных обстоятельствах, а модели возникновения там происшествий, изображающие данный процесс как последовательность случайных событий, которые приводят к возникновению и развитию их причинной цепи. Выбор метода обычно определяется в каждом конкретном случае, исходя из их достоинств и недостатков, цели исследования и природы рассматриваемого объекта (процесса), а также с учетом имеющихся исходных данных.

Рассмотренная только что общая последовательность формализации и моделирования опасных процессов в техносфере должна завершаться проверкой полученных при этом результатов на правдоподобность. При этом рекомендуется тщательно проверять не только конечные и промежуточные результаты, но и используемые исходные данные. Всякие отклонения от привычных представлений и «здравого смысла» должны многократно перепроверяться с помощью других способов моделирования и, если возможно, путем сравнения с достоверными статистическими данными.

В заключение данного параграфа предостережем от иллюзий о получении путем моделирования точных количественных прогнозов таких интегральных

показателей техносферных процессов, как, например, уровень их безопасности, и о хорошем совпадении Найденных при этом результатов со статистикой или опытом. Это объясняется не только несовершенством известных в настоящее время моделей и методов, но и чрезвычайной сложностью исследуемых здесь объектов (человеко-машинных систем), делающей принципиально невозможным точные априорные количественные оценки их интегральных параметров.

Однако даже приближенное количественное определение базовых показателей безопасности и риска проведения техносферных процессов, необходимое для ориентировочной оценки и сравнения различных альтернативных проектов, безусловно, оправданно. Одним из самых подходящих для этого классов семантических моделей являются рассматриваемые ниже диаграммы причинно-следственных связей, называемые диаграммы влияния».

4.3. Основные понятия и виды диаграмм влияния

Как следует из предыдущих рассуждений, основные *требования* к моделированию опасных процессов в человеко-машинных системах заключаются в необходимости учета их особенностей и цели исследования. Применительно к изучению условий появления техногенных происшествий они должны состоять: а) из учета лишь наиболее существенных факторов аварийности и травматизма; б) сочетания возможностей их описания и оценивания количественных характеристик; в) использования таких языков и алгоритмов, которые не велики по алфавиту, достаточны для семантического представления исследуемых категорий и пригодны для средств электронной вычислительной техники.

Наиболее удовлетворяют данным требованиям модели, представляющие процесс появления отдельных предпосылок и развития их в причинную цепь происшествия в виде соответствующих диаграмм причинно-следственных связей. Под такими диаграммами обычно понимают некоторое формализованное представление моделируемых категорий (объектов, процессов, целей и свойств) в виде множества графических символов (узлов, вершин) и отношений - предполагаемых или реальных связей между ними. Самое широкое распространение в настоящее время получили диаграммы в форме различных графов (либо потоковых состояний и переходов), деревьев событий (целей, свойств) и функциональных сетей различного предназначения и структуры, в том числе стохастической.

Как показывает опыт применения перечисленных диаграмм влияния, их основными *достоинствами* являются: высокая информативность представления и описания исследуемых категорий, хорошая наглядность и декомпозируемость, доступность и однозначность понимания пользователем, удобство интерпретации и обработки на средствах вычислительной техники, возможность применения формализованных процедур системного анализа этих моделей и системного синтеза мероприятий по совершенствованию их оригиналов.

Диаграммы влияния как средств формализации опасных процессов, связанных с функционированием человеко-машинных систем, занимают особое место, так как позволяют описывать, а затем и оценивать предикаты первого, второго и высших порядков, являющихся соответственно их свойствами, отношениями между ними и другими категориями. Это достоинство обусловлено

возможностью применять различные языки описания, позволяющие переходить от смысловых моделей к знаковым и использовать последние для анализа и синтеза с помощью современных математических и машинных методов.

Из определения диаграммы влияния следует, что основными компонентами ее структуры служат узлы (вершины) и связи (отношения) между ними. В качестве узлов обычно подразумевают простейшие элементы моделируемых категорий (переменные или константы) - события, состояния, свойства, а в качестве связей активности работы и ресурсы. Перечисленные компоненты диаграмм графически представляются в виде тех геометрических фигур, которые приведены на рис. 4.3, совместно с их основными характеристиками.

Каждые два соединенных между собой узла образуют ветвь диаграммы. В тех случаях, когда узлы связаны направленными дугами таким образом, что каждый из них является общим ровно для двух ветвей, возникают циклы или петли.

Строка	Символ	Название	Назначение в модели
1		Состояние Событие Свойство	Обозначение существенных элементов объекта (процесса)
2		Исходное или конечное событие	Элементы, не подлежащие дальнейшему анализу
3		Знак «или»	Выход — при наличии любого из входных условий
4		Знак «и»	Выход — при условии одновременно всех входов
5		Стохастический вход и выход	Начало соблюдения условия — с вероятностями P_1, P_3
6		Стохастический узел-разветвление	Начальное и конечное условия — с вероятностями P_1, P_2, P_3
7		Отношение	Эпизодическое или логическое влияние
8		Связь Влияние	Постоянное одностороннее или двустороннее действие
9		Маркер (фишка) узла сети Петри	Состояние моделируемого процесса или объекта

Рис. 4.3. Характеристика символов, применяемых в диаграммах влияния

Петли могут характеризоваться порядком, величина которого n определяется количеством не связанных между собой петель первого порядка. В свою очередь, петля первого порядка не должна содержать внутри себя другие петли и обеспечивать достижимость ее любых узлов.

Переменные в узлах характеризуются фреймами данных - множеством выходов (значений, принимаемых переменными, неизменных во времени и между собой не пересекающихся) - и условными распределениями вероятностей появления каждого из них. Условные распределения приписываются на диаграмме дугами

ли ребрам, соединяющим отдельные узлы. В вырожденных случаях вероятностного распределения узел может превращаться в константу, принимающую маргинально (граничное) значение переменной. Вместо условных распределений допускается использование в диаграммах и отдельных значений, принимаемых переменными.

Одним из достоинств диаграмм влияния, как отмечалось выше, является их легкость сопряжения с другими способами формализации и моделирования. С помощью предварительно построенных диаграмм - графов, сетей и деревьев - могут быть получены, например, математические модели появления аварийности и травматизма. Созданные при этом аналитические модели пригодны для статистического моделирования данного явления и решения задач совершенствования безопасности методами оптимизации. Однако для осуществления перехода от графических моделей к математическим нужна дополнительная символика.

Вот почему переменные и константы, подразумеваемые узлами диаграммы влияния, в последующем будут обозначаться символами, объединенными в такие пять или четыре (в зависимости от их набора) множества:

$U = \{1, 2, 3, \dots, j, \dots, u\}$ - множество узлов или вершин диаграммы;

$N = \{v_1, v_2, v_j, \dots, v_u\}$ - множество переменных, им соответствующих;

$n_j = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots\}$ - набор значений, принимаемых j -й переменной;

$f_j \in F$ - плотность вероятности распределения стохастической переменной j ;

$\pi \in \Pi$ - функция принадлежности лингвистической переменной.

Для обозначения отношений между переменными (узлами, вершинами) диаграммы влияния также следует использовать соответствующие массивы символов. Эти массивы могут быть представлены следующими образом:

$D_{ij} = \{d_1, d_2, d_3, \dots\}$ - множество дуг (ребер), соединяющих узлы i и j ;

A_j - вектор дуг предцессоров (выходящих из предшествующих узлу j и входящих в него);

B_j - вектор дугаксессеров (выходящих из узла j и связывающих его с последующими);

P_{ij} - вектор мер возможности или вероятности переходов между i и j ;

T_{ij} - вектор изменений ресурса (затрат средств или времени) при переходе из узла i в узел j .

Введенные обозначения позволяют формализовать и однозначно интерпретировать в последующем конкретный опасный процесс и/или объект техносферы, представленный диаграммой влияния. Например, основные характеристики ее узлов (вершин) могут быть выражены таким кортежем $\langle U, N, \Omega, F, \pi \rangle$, а заданные диаграммой отношения или связи между ними $\langle D, A, B, P, T \rangle$. В свою очередь, математическое представление всей диаграммы влияния в общем случае может быть выражено такой металингвистической формулой:

$$\langle \text{Диаграмма влияния} \rangle = \langle U \wedge N \wedge F | \pi \wedge D \wedge A \wedge B \wedge P | T \rangle. \quad (4.1)$$

Охарактеризуем подробнее основные типы диаграмм влияния и проиллюстрируем их с помощью простейших примеров.

Пожалуй, самым известным типом рассматриваемых здесь диаграмм влияния является граф, возможность использования которого в исследовательских целях была продемонстрирована еще в 1736 г. Л. Эльером при решении так называемой «задачи О кенигсбергских мостах». *Графом* называют множество вершин и набор упорядоченных или неупорядоченных их пар, используемых для визуального представления моделируемого процесса.

Упорядоченные пары вершин соединяются дугами, а неупорядоченные (неориентированные) пары - ребрами графа. Признаком упорядоченности пары вершин является изменчивость моделируемых ими характеристик в зависимости от последовательности их попарного рассмотрения. Математическое выражение моделируемого графом процесса может иметь вид следующего кортежа: $\langle U, N, D, P \rangle$.

При моделировании условий возникновения происшествий в техносфере ниже будем использовать ориентированные графы, характеризующиеся определенным набором состояний рассматриваемой человеко-машинной системы и возможными переходами между ними. Графически состояния исследуемого процесса представляются точками, окружностями или другими промаркированными геометрическими фигурами, а переходы между ними - линиями со стрелками на одном конце - так, как это сделано на рис. 4.4. Если состояния графа не имеют сацессеров или способны временно приостанавливать моделируемый им процесс, то их иногда называют «поглощающие состояния», а помечаются они точками (см. состояния 5 и 6 рис. 4.4), расположенными внутри соответствующей геометрической фигуры.

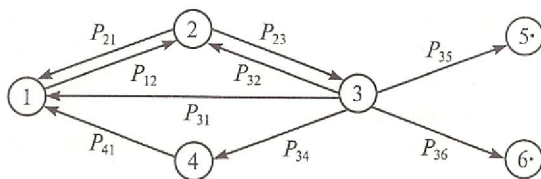


Рис. 4.4. Граф смены состояний

Рассматриваемый на данном рисунке процесс возникновения происшествий в человеко-машинной системе, например, характеризуется шестью состояниями. Из них первые четыре являются как бы проходными - безопасное, опасное, предаварийное, послеаварийное, а два - состояния системы после смертельного несчастного случая и ее состояние после катастрофы, а также девятью переходами с соответствующими вероятностями. Следовательно, исследуемый процесс может быть зарегистрирован как имеющий такие значения введенных нами ранее параметров:

$$\begin{aligned}
 U &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \\
 V &= \{\text{вышеприведенные наименования состояний}\}, \\
 D &= \{1-2, 2-1, 2-3, 3-2, 3-1, 3-4, 3-5, 3-6, 4-1\}, \\
 P &= \{P_{12}, P_{21}, P_{23}, P_{32}, P_{31}, P_{34}, P_{35}, P_{36}, P_{41}\}. \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

Другим способом задания исследуемых здесь опасных процессов или объектов

может служить использование различных таблиц, матриц и функций. Порядок представления, преобразования, анализа и синтеза графов с помощью матриц истинности, смежности, инцидентности, а также и соответствующих им передаточных или проводящих функций моментов подробно описан, например, в работах [28, 32, 54]. Некоторые из указанных выше способов формализации и моделирования процесса появления техногенных происшествий будут проиллюстрированы на конкретных примерах.

В исследованиях по техносферной безопасности, однако, более широкое распространение сейчас получили диаграммы причинно-следственных связей, имеющие ветвящуюся структуру и называемые «деревом» (в отечественной литературе встречаются различные интерпретации англоязычных выражений *fiult free* и *evenfs free*. При системном анализе и моделировании опасных процессов в техносфере под ними следует подразумевать соответственно дерево происшествия и дерево событий - последствий какого-либо происшествия). Впервые возможность использования подобных диаграмм влияния для нужд оценки надежности и безопасности эксплуатации американских ракетных систем «Минитмен» была продемонстрирована Х. Уотсоном в 1961 г. В настоящее время чаще всего используются два типа этих диаграмм - дерево происшествия и дерево событий, каждая из которых представляет собой разветвленный, конечный и связной граф, не имеющий петель или циклов.

Последние два свойства означают, что каждая пара вершин диаграммы типа дерева должна быть связанной (соединенной цепью), однако все ее соединения не должны содержать в себе такие маршруты, вершины которых одновременно являются началом одних и концом других цепей. Кратко охарактеризуем самые отличительные признаки каждой такой диаграммы влияния с помощью рис. 4.5.

Семантическая модель типа дерева происшествия (рис. 4.5, а) обычно включает одно головное событие, которое соединяется с помощью конкретных логических условий с промежуточными и исходными предпосылками, обусловившими в совокупности его появление. Головное событие такого дерева представляет собой аварию, несчастный случай или катастрофу, а его «ветвями» служат наборы соответствующих предпосылок, образующие их причинные цепи. Листьями же дерева происшествия служат исходные события-предпосылки (ошибки, отказы и неблагоприятные внешние воздействия), дальнейшая детализация которых нецелесообразна.

Процесс появления конкретного происшествия в техносфере в последующем будет интерпретироваться данной моделью как прохождение некоторого сигнала от каких-либо исходных предпосылок, инициирующих причинную цепь (служащих истоками такого сигнала), к головному событию, являющемуся как бы его стоком. В качестве промежуточных состояний рассматриваемого дерева применяются предпосылки верхнего и последующих уровней, а узлов-регуляторов потока - логические условия сложения «или» и перемножения «и», используемые в булевой алгебре.

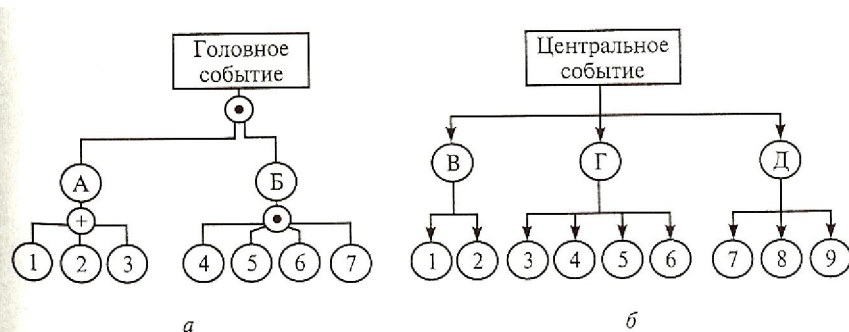


Рис. 4.5. Модели диаграмм типа «дерево»

а - дерево происшествия; *б* - дерево событий (его исходов)

Подобно дереву происшествия, дерево событий - его исходов (см. рис. 4.5, б) также имеет одно событие, называемое центральным, и несколько исходящих из него ветвей. В качестве центрального события всегда рассматривается какое-либо происшествие (чаще всего – головное событие соответствующего дерева), а ветвей - сценарии причинение ущерба ресурсам, отличающиеся по условиям нежелательное высвобождения, распространения, трансформации и воздействия на них потоков энергии и вещества, высвободившихся в результате происшествия.

В отличие от дерева происшествия дерево событий - его возможных разрушительных исходов не имеет логических узлов «и», «или». В сущности, данная семантическая модель представляет собой вероятностный граф (многоярусное дерево решений), построенное так, что сумма вероятностей каждого разветвления должна составлять единицу. Иначе говоря, все события каждого уровня должны образовывать полную группу независимых событий.

Как видно из рис. 4.5, при моделировании происшествий и их разрушительных исход с помощью семантических диаграмм причинно-следственных связей типа дерево, используется символика, принятая ранее (см. рис. 4.3). В последующем учитываемые в них события будут изображаться прямоугольниками или окружностями с надписями или шифровыми кодами, а логические узлы малыми кругами со знаками: «+» (для логического условия «или») и «•» (для условия «и»). Математическая же запись каждого подобного дерева, как и ранее, может быть выражена в общем случае кортежем такого вида: $\langle U, N, \Omega, D, A, B, P \rangle$. Наиболее компактное аналитическое представление условий возникновения конкретного происшествия удобно делать также с соблюдением правил алгебры событий. Например, для представленного на рис. 4.5, а дерева справедливо следующее алгебраическое выражение:

$$\text{головное событие} = (AB) = (1 \times 2 \times 3)(4 + 5 + 6 + 7). \quad (4.3)$$

О том, как применяют, подобные формулы, строить и исследовать обстоятельства предупреждения конкретных аварий и катастроф в техносфере, будет показано несколько ниже - на конкретных примерах, с использованием точных и приближенных количественных оценок параметров происшествия.

В последнее время для нужд исследования техносферы интенсивно разрабатываются диаграммы влияния, относящиеся к классу семантических функциональных сетей. Такие сети также являются графами, но отличаются

дополнительной информацией, содержащейся в их узлах и дугах (ребрах). Из них наиболее пригодны для исследования условий возникновения и предупреждения техносферных происшествий так называемые сети стохастической структуры типа Петри и *GERT** (в отличие от более известных сетей *PERT Program Evaluation and Research Technique* - методика сетевого планирования и управления) более совершенные сети *GERT (Graphic Evaluation and Review Technique)* пока что не нашли в России должного применения).

Достоинства таких сетей: а) возможность объединения логических и графических способов представления исследуемых событий; б) учет стохастичности информации, выраженной узлами и дугами; в) доступность для моделирования параллельно протекающих, циклических и многократно наблюдаемых процессов; г) наибольшие (по сравнению с другими типами диаграмм) логические возможности - в смысле строгости, компактности и простоты корректировки условий наблюдения моделируемых событий и явлений [24, 50, 54].

Отличительной же особенностью функциональных сетей типа Петри и *GERT* служит не детерминистская (как *PERI*), а так называемая стохастическая структура. Это означает, что для завершения моделируемого ими процесса или появления интересующего исследователя события необходимо реализовать не все дуги предцессоры и саксессоры, а только ту их совокупность, которая минимально необходима и достаточна для этого. В тех случаях, когда соответствующий ресурс является переменной величиной, реализация конкретных дуг сети сопровождается выбором ее значения в соответствии с заданным им вероятностным или возможностным распределениями.

Учитывая перспективность и дефицит отечественных публикаций по моделированию аварийности и травматизма с помощью рассматриваемых здесь функциональных стохастических сетей, остановимся подробнее на их особенностях. Эти сети имеют в общем случае четыре типа символов - источник, сток, метка или планка и статистика. Как и в других диаграммах влияния, узлы изображаются окружностью, планкой (вертикальной жирной чертой) или иными фигурами, иногда помеченными какими-либо маркерами; дуги - линиями со стрелками, исходящими и входящими в узлы.

Заметим также, что в отличие от графов и деревьев узлы сети Петри могут характеризоваться еще и раскраской, а сети *GERT* числом степеней свободы. Раскраска, т. е. использование разноцветных маркеров, позволяет учесть разнородность состояний или потоков информации, моделируемых сетями Петри, а введение степеней свободы - количество условий предцессоров, необходимых для реализации конкретного узла сети *GERT*. В целом же эти и другие дополнительные возможности стохастических функциональных сетей позволяют не только увеличить множество учитываемых признаков моделируемого объекта или процесса, но и упростить их структуру.

Проиллюстрируем содержание приведенных выше понятий с помощью представленных на рис. 4.6 двух простейших диаграмм рассматриваемого здесь типа: а) сеть *GERT* и б) сеть Петри. Каждая из них содержит по шесть узлов и семь связей между ними. Да и интерпретируют эти сети фактически однотипные

процессы в техносфере, содержание которых будет раскрыто частично здесь после пояснения предназначения всех элементов этих двух моделей, а также непосредственно перед количественным анализом одной из них.

Начнем с рассмотрения узлов U и дуг сети $GERT$ (рис. 4.6). Ее узел 1 служит истоком (не имеет входных дуг), а узлы 2 и 5 являются стохастическими по выходу. Последние имеют соответственно две и одну инцидентные по входу связи – предцессоры со степенями свободы, равными единице - для начальной (цифры 1 в левом верхнем секторе узлов) и последующих реализаций процесса (такие же цифры в соответствующих нижних секторах). Узлы же 4 и 6 служат в рассматриваемой сети стохастической структуры одновременно стоками (у них нет выходных дуг) и статистиками.

А вот узел 3 является стохастическим узлом-разветвлением (см. рис. 4.6), он имеет две степени свободы в первой реализации и одну - в последующих. Данная сеть содержит в себе также и две петли: собственную в узле 2 и петлю, образуемую дугами d_{23} и d_{32} между соответствующими узлами. Последняя петля, как и предыдущая, является петлей первого порядка, хотя и включает в себя только что упомянутую, но они не связаны между собой.

Поясним, что некоторые узлы сети $GERT$ могут иметь число степеней свободы, превышающее количество своих дуг предцессоров. В данном случае к ним относится узел 3, который хотя и обладает одной входной дугой d_{23} , но требует для открытия в первой реализации двух степеней свободы. В подобных ситуациях предполагается многократность реализации отдельных входных условий: пропуск сигнала такими узлами возможен лишь после многократной (двукратной - для узла 3) реализации части входных дуг.

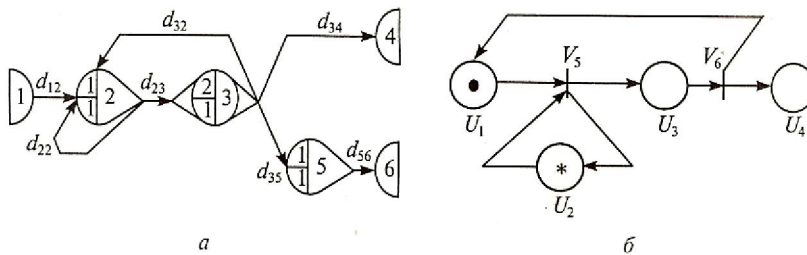


Рис. 4.6. Модели диаграмм типа «сеть стохастической структуры»: а - сеть $GERT$; б - сеть Петри

Что касается сети Петри (см. рис. 4.6), то она уже включает в себя: 1) позиции двух типов: а) узлы, обозначенные окружностями с символами U_1, U_2, U_3, U_4 и б) узлы, изображенные планками с кодами V_2 и V_5 , а также 2) дуги, отличающиеся по отношению к планкам следующим: а) d_{15}, d_{25} и d_{36} , являются для них дугами - предцессорами и б) d_{52}, d_{53} и d_{64} служат у этих же узлов в качестве дуг - саксессоров, т. е. входят и исходят из них. При этом узлы - окружности обычно соответствуют состояниям, в которых может находиться моделируемый объект, а узлы-планки - событиям, влекущим их возможные изменения в последующем.

Кроме того, в рассматриваемой здесь сети также имеются две петли: 1) собственная для планки V_5 , состоящая из двух инцидентных ей дуг $d_{52}-d_{25}$; 2) образуемая позициями 1, 5, 3, 6 и дугами $d_{15}-d_{53}-d_{36}-d_{61}$. Есть здесь и состояния 1 и

2, помеченные разноцветными фишками (на рис. 4.6, б точкой и звездочкой внутри соответствующих окружностей). Их наличие в каждой из предшествующих планке V_2 позиции указывает на соблюдение тех предусловий, которые необходимы и достаточны для запуска моделируемого процесса, т. е. для смены исходных состояний объектов.

После завершения краткого знакомства с представленными на рис. 4.6 сетями *GERT* и Петри изложим логику возможного протекания заданных ими процессов. Сделаем это последовательно, с кратким пояснением здесь физического смысла того из них, который представлен на этом рисунке справа. А вот процесс, интерпретируемый в его левой части, будет подвергнут не только подробному смысловому, но и количественному анализу в начале завершающей главы данной части учебника (см. разд. 7.1).

Предполагается, что в сети, показанной на рис. 4.6, а, вначале может реализоваться связь d_{12} , после чего следует ожидать осуществления воздействия по одной из выходных дуг d_{23} или d_{22} узла 2. После двух реализаций связи d_{23} должен открыться узел 3 и процесс может пойти по одному из трех возможных направлений. Если реализуется условие d_{34} , то он будет завершен, а если – d_{35} , то его прекращению в отдельных случаях будет предшествовать осуществление воздействия d_{56} . В случае реализации выхода d_{32} процесс может возобновиться с момента осуществления связей d_{23} и d_{22} , однако его предыстория будет зафиксирована узлами-метками и узлами-статистиками 2, 3, 5 и 4, 6 соответственно.

Подобная картина будет иметь место и в сети, размещенной на рис. 4.6, б. В данном случае запуск моделируемого процесса будет сопровождаться перемещением фишки-точки из позиции 1 в 3, тогда как фишка-звездочка, пробежав по петле $d_{25}-d_{52}$, вновь окажется в состоянии 2, поскольку лишь такая их диспозиция удовлетворяет соответствующему правилу. Далее, моделируемый сетью Петри процесс будет характеризоваться переходом фишки точки из позиции 3 одновременно в состояния 4 и 1.

Что касается физического смысла только что рассмотренного процесса, то он может интерпретировать, например, функционирование некоторой супер ЭВМ, работающей в режиме одновременной обработки пакета прикладных программ и периодического автотестирования. При этом считается, что: а) позиции этой сети U_1, U_3, U_4 касаются очередного задания: оно находится в очереди, выполняется и ожидает вывода; б) состояние U_2 ожидания соответствующего процессора, а позиции V_5, V_6 - начала и завершения выполнения конкретного задания. Естественно, что начальное положение системы «суперЭВМ-пакет заданий» будет отличаться от того, которое она займет после возвращения фишки-точки в позицию U_1 .

Как видно из приведенных выше иллюстративных примеров, сети стохастической структуры позволяют моделировать различные процессы в техносфере и прогнозировать альтернативные исходы. Вероятность их реализации зависит от распределения тех случайных или лингвистических переменных, которые задаются узлами или ветвями каждой такой сети. Помимо вероятностных параметров, рассматриваемые модели используют практически

весь набор данных, предусмотренных для семантического и семиотического моделирования с помощью диаграмм влияния.

Таким образом, приведенные выше основные характеристики диаграмм влияния свидетельствуют о широком спектре возможностей и перспективности данного способа формализации и моделирования опасных процессов в техносфере. Отдельные приложения и области наиболее предпочтительного использования соответствующих моделей и методов исследования возможных там происшествий будут подробно раскрыты на конкретных примерах. При этом основной акцент ниже делается на выявлении интересующих нас закономерностей и количественной оценке их параметров.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные этапы системного исследования техносферы.
2. В чем заключается предназначение эмпирического системного анализа?
3. Какова цель проблемно-ориентированного описания объекта и цели исследования?
4. Укажите основные задачи, решаемые в процессе теоретического системного анализа и системного синтеза.
5. Раскройте значение термина «формализацию» и укажите его связь с моделированием.
6. Приведите лингвистические переменные, характеризующие рост и вес человека.
7. Как вы представляете себе функцию принадлежности лингвистической переменной «мужчина среднего роста»?
8. Какие модели и методы моделирования более предпочтительны для системного исследования опасных процессов в техносфере?
9. Перечислите недостатки, порождаемые неудачно выбранной структурой модели.
10. В чем заключаются основные достоинства диаграмм влияния?
11. Какие диаграммы причинно-следственных связей вам известны?
12. Что такое «петля» И как определить ее порядок?
13. В чем состоит основное отличие диаграммы типа дерево от графа?
14. Чем отличается головное событие от центрального события диаграмм типа дерево?
15. Назовите типы сетей детерминистской и стохастической структуры.
16. Какие виды узлов используются в стохастических сетях типа *GERI*?
17. В каких сетях и зачем применяется окраска, т.е. разноцветность узлов?
18. На что указывает и где применяется число степеней свободы узла?
19. Чем отличаются между собой типы узлов и дуг, используемых в одной и той же сети Петри?
20. Какие из рассмотренных в этой главе диаграмм влияния являются наиболее совершенными и почему?