

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Майкопский государственный технологический университет»**

# **ОПТИМИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и  
заочной форм обучения по направлению подготовки 13.03.02  
Электроэнергетика и электротехника**

Майкоп – 2019

**УДК 621.311(07)**

**ББК 31.2**

**О - 62**

**СОСТАВИТЕЛЬ: Старков Н.Н., кандидат технических наук, доцент**

**Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. СЛОЖНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>4</b>
1.1. Понятие системы. Общие определения .....	4
1.2. Иерархия энергетических систем .....	9
1.3. Принятие решений при управлении сложными системами.....	12
1.4. Особенности системы электроснабжения .....	14
1.5. Особенности автоматизированного управления в СЭС .....	19
1.6. Анализ причин неопределенности информации в ЭЭС .....	23
1.7. Компоненты сложной системы.....	27
1.8. Понятие модели и моделирования. Классификация моделей .....	33
1.9. Задачи оптимизации и основные понятия .....	40
<b>2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОПТИМИЗАЦИИ.....</b>	<b>45</b>
2.1. Характеристика задач оптимизации.....	45
2.2. Обозначения и терминология.....	46
Список литературы.....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Качественное и надежное энергоснабжение с его последующим рациональным и экономичным использованием – залог успешной работы любого предприятия. Одним из главных факторов в этом является организованная, продуманная и эффективная система энергоснабжения. Современный этап развития энергетического комплекса в России предопределяет необходимость разработки механизмов и инструментов, использование которых позволит обеспечить максимально эффективное функционирование энергосистем. Все большее значение отводится решению задач, связанных с оптимизацией функционирования систем энергоснабжения, которые должны обеспечивать высокий уровень технологической безопасности, качественное решение социальных задач, высокую экономическую эффективность.

При проектировании и эксплуатации систем энерго- и электроснабжения приходится иметь дело с многовариантными задачами, в которых из некоторого множества допустимых по техническим условиям решения нужно выбрать одно, которое является лучшим по какому либо критерию.

Оптимальное управление развивающимися и саморазвивающимися энергетическими системами, применительно к энергетике, требует изучения закономерности их оптимального управления, развития и функционирования.

Важной составной частью управления энергосистемой является ведение оптимальных режимов. Применение методов оптимизации состоит, прежде всего, в отыскании допустимых, удовлетворяющих условиям надежности энергоснабжения и надлежащего качества энергии, режимов. Не меньшее значение имеет выбор из числа допустимых режимов наиболее экономичного, что позволяет практически без дополнительных затрат обеспечить экономию за счет снижения расхода топлива и потерь в электрических и тепловых сетях.

Оптимизация режимов работы энергосистемы – сложная многоуровневая иерархическая задача. Оптимальный режим энергосистемы – это такой режим из допустимых, удовлетворяющих условиям надежности и качества электроэнергии, при котором обеспечивается минимум затрат при заданной в каждый момент времени нагрузке потребителей. Исключительная сложность оптимального управления режимами определяется не только большим количеством управляемых элементов, но и тем, что разные регулируемые и настраиваемые параметры требуется поддерживать оптимальными на большой территории.

Целью учебного пособия является помощь магистрантам в освоении системы знаний о фундаментальных и прикладных возможностях методов оптимизации систем энергоснабжения, в том числе и агропромышленного направления, ознакомление их с математическими методами описания, исследования и оптимизации электроэнергетических процессов и энергетического оборудования.

# 1. СЛОЖНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

## 1.1. Понятие системы. Общие определения

*Система* представляет собой совокупность элементов, являющаяся объектом исследования, изучения или наблюдения. Элементами могут быть физические объекты (оборудование, машины, приборы, здания и т.п.), явления (нагревание, охлаждение, свечение, электромагнетизм), процессы, в том числе и технологические (регулировка, ремонт и т. п.) [3, 5, 7, 12, 17].

*Элемент системы* – ее неделимая часть в рамках конкретного исследования, реализующая конкретные функции. Элемент системы описывается множеством различных характеристик, параметров, связями с соседними элементами. Связи между элементами делают систему единым целым. Элементы отличаются друг от друга выполняемыми функциями, состояниями, входами и выходами. Любой элемент может рассматриваться как более мелкая система.

Термин «система» появился в научной литературе давно и является таким же неопределенным, как термины «множество» или «совокупность». Наиболее широко этот термин первоначально использовался в механике, где обозначал материальную систему, т.е. совокупность материальных точек, подчиненных определенным связям. В дальнейшем понятие системы было распространено на биологические, экономические, технологические и другие объекты.

Система – понятие относительное. Некоторая совокупность элементов может быть частью более крупной системы, небольшой ее частью или рассматриваться самостоятельно, не зависимо от окружающего мира. Это зависит от цели исследования. Для установления системы, сферы ее действия необходимо выявить ее границы и состав. При установлении границ системы выявляются причинно-следственные взаимосвязи между ее элементами.

Для выделения системы требуется определить:

- цель, для достижения которой формируется система;
- объект исследования, состоящий из множества элементов, связанных с точки зрения цели в единое целое системными признаками;
- субъект исследования, наблюдения, заказчика, формирующего систему;
- характеристики внешней среды по отношению к системе и отражение их взаимосвязей с системой.

*Цель функционирования* определяет системные признаки, с помощью которых описываются элементы системы. Система с точки зрения цели есть упорядоченное представление об объекте (существующем или проектируемом). Разные субъекты, в зависимости от цели, могут иметь свои представления об элементах системы, их взаимосвязях и связях с внешней средой.

*Цель* – это субъективный образ, абстрактная модель несуществующего, но желаемого состояния производства, которое решило бы возникшую проблему.

Цели, которые ставит перед собой человек, редко достижимы только за счет его собственных возможностей, или возможностей производства, к которому он причастен.

Стечение обстоятельств, характеризующееся различием между необходимым (желаемым) и существующим, называется проблемой, или проблемной ситуацией. Проблема существующего положения, в частности с производством продукции, осознается в несколько стадий: от смутного ощущения, что «что-то не так», к осознанию потребности, затем выявлению проблемы и, наконец, к формулировке цели.

Вся последующая деятельность, способствующая решению этой проблемы, направлена на достижение поставленной цели. Эта деятельность направлена на отбор из окружающей среды элементов, свойства которых можно использовать на достижение поставленной цели, и на объединение этих элементов надлежащим образом, т.е. как работу по созданию того, что мы называем системой.

*Упорядоченность представления субъекта* есть целенаправленное выделение элементов системы, установление их признаков, взаимосвязей между собой и с внешней средой. При выделении системы учитывают наиболее существенные признаки, все второстепенное, несущественное – исключается.

*Решение проблемы* есть то, что заполняет промежуток между существующей и желаемой системами. Значение для человека имеют наглядные, образные, визуальные модели.

Для наглядного представления системы ее изображают в виде «черного ящика», выделенного из окружающей среды и имеющего входы и выходы, рис. 1.1. Название «черный ящик» образно подчеркивает полное отсутствие сведений о внутреннем содержании ящика: задаются, фиксируются, перечисляются только входные и выходные связи системы со средой. Такой подход, несмотря на его простоту и на отсутствие сведений о внутренней структуре системы, часто оказывается полезным.

Сопоставляя входы и выходы за ряд моментов времени, находят такие входные параметры  $X$ , при которых рассчитанные значения выходных параметров  $Y$  лучше всего аппроксимируют фактические значения выходов.

Сущность метода «черного ящика» состоит в том, что при исследовании объектов они рассматриваются как недоступный для наблюдения, изучения и описания «черный ящик», имеющий определенные входы и выходы. Вследствие сложности устройства «черного ящика», т.е. изучаемого объекта, возможно лишь наблюдать состояние входов в него и соответствующих им выходов, т.е. изучать поведение, не зная его внутреннего устройства.

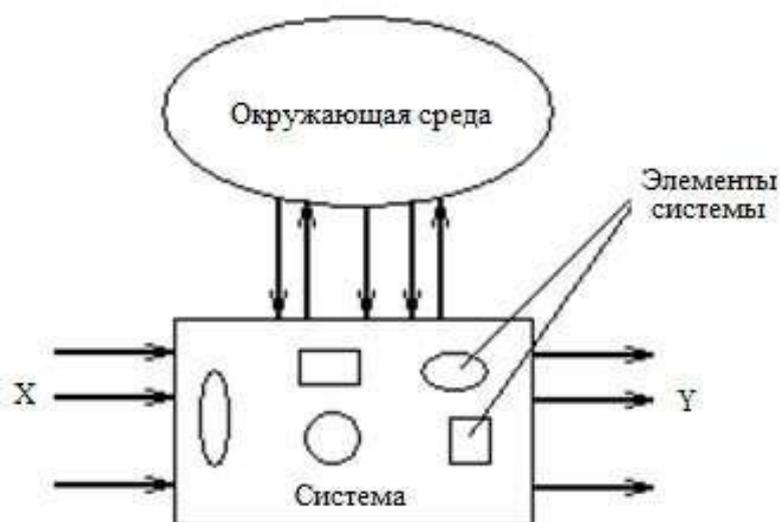


Рис. 1.1. Понятие «черного ящика»

Однако, как бы детально ни изучалось поведение «черного ящика», нельзя вывести обоснованного суждения о его внутреннем устройстве, ибо одним и тем же поведением могут обладать различные объекты, а одно и то же соотношение между входами и выходами может в пределах имеющихся статистических данных удовлетворительно описываться несколькими различными математическими выражениями. С увеличением числа факторов регрессионной модели обычно падает ее достоверность. Как показывает практика, удовлетворительные модели получаются при описании ситуации, в которой выходной фактор существенно связан не более чем с пятью-шестью входными факторами.

Во многих случаях достаточно содержательного словесного описания входов и выходов.

Различают *детерминированные* и *стохастические* системы.

В детерминированных системах цель исследования полностью определена, сами элементы и отношения между ними и внешней средой известны.

Системы со стохастической структурой не имеют либо ясно выраженной цели исследования, либо выраженных существенных элементов и отношений между ними (признаков). Подобные системы выделяются на этапах разработки, проектирования сложных производств, технологических процессов и оборудования.

Системы разделяются на *управляемые* и *неуправляемые*. Управление можно определить как организацию различных действий, процессов для достижения намеченной цели.

*Управляемые системы* обеспечивают целенаправленное функционирование при изменяющихся внутренних или внешних условиях. Управление осуществляется человеком или специальным устройством (для технических систем). К управляемым системам относятся, например, движение автотранспорта, работа технологической линии или предприятия в целом.

*Неуправляемые системы* не обеспечивают целенаправленного функционирования. К неуправляемым относятся стихийные явления природы, работа оборудования после отказа, движение ветра.

При рассмотрении, анализе и синтезе систем существуют два подхода: *индуктивный* (классический) и *системный*.

*Индуктивный подход* предполагает изучение системы путем перехода от частного к общему и дальнейший системы за счет слияния ее компонентов.

*Системный подход* предполагает переход от общего к частному при выделении исследуемого объекта из окружающей среды при единой цели.

Структуру системы можно изучать исходя из состава отдельных подсистем (структурный подход) или путем анализа функционирования отдельных свойств, позволяющих достичь заданной цели (функциональный подход).

*Структурный подход* позволяет выделить состав элементов системы и связи между ними. Наиболее общее описание структуры – топологическое описание на базе теории сетей и графов.

*Структура системы* – совокупность связей между элементами системы, отражающая их взаимодействие. Структура системы может изучаться с разных позиций – извне (состава отдельных элементов системы и отношений между ними) и изнутри (при анализе свойств системы, приводящих к намеченной цели). Связи между элементами, определяющие систему, могут быть устойчивые, неустойчивые, статистически устойчивые.

*Устойчивые связи* существуют постоянно в течение рассматриваемого промежутка времени или возникают регулярно.

*Неустойчивые связи* возникают редко, от случая к случаю.

*Статистически устойчивые связи* с течением времени стремятся к определенным значениям.

Связи могут определяться экономическими отношениями, физическими или социальными законами, отношениями родства, подчинения и т.д. Они могут быть функциональными, информационными, причинными, логическими и т.д.

*Функциональный подход* рассматривает отдельные функции, алгоритмы, приводящие к достижению цели.

Характеристики системы могут быть количественные и качественные. Количественно система характеризуется числами, выражающими отношение между заданной величиной (эталоном) и исследуемой величиной. Качественные характеристики выражаются описанием типа хороший, плохой, больше, меньше или с помощью различных шкал, например методами экспертных оценок.

*Функционирование системы* – проявление функций системы во времени, переход от одного состояния к другому (движение в пространстве состояний). При использовании системы важно качество ее функционирования. Один и тот же закон функционирования может быть реализован с помощью различных алгоритмов. Процесс функционирования можно рассматривать как последова-

тельную смену состояний, Совокупность всех возможных значений состояний системы называют пространством состояний системы.

*Внешняя среда* – множество существующих вне системы элементов любой природы, оказывающих влияние на систему или находящихся под ее воздействием. Внешняя среда определяет условия функционирования системы посредством воздействия *внешних факторов*, являющихся движущей силой процесса и определяющих характеристики этого процесса. В зависимости от цели внешние факторы могут быть стимулирующими, регулируемыми, ограничивающими, возмущающими и разрушающими.

*Стимулирующие факторы* стимулируют развитие процесса.

*Регулирующие, управляющие факторы* приводят к изменению целей, режимов и алгоритмов функционирования системы.

*Ограничивающими факторами* являются различные нормативно-правовые акты, законы, нормы поведения, технические условия, регламенты и стандарты функционирования технологических процессов и технических систем.

*Возмущающие факторы* – это отрицательные факторы, негативно влияющие на работу системы, достижение ее цели. Эти факторы можно спрогнозировать и компенсировать.

*Разрушающие факторы* – это отрицательные факторы, которые сложно спрогнозировать, а значит, и предотвратить. Они приводят к частичному или полному уничтожению системы.

Отношения между элементами системы и системой определяются их иерархией.

*Иерархия* – это упорядоченная по старшинству совокупность элементов и подсистем, входящих в данную систему, например, завод – цех – участок – линия – аппарат.

В *иерархической системе* объект расчленяется на уровни согласно принципу подчинения низших уровней высшим. Степень декомпозиции будет определяться как спецификой решаемой задачи, так и имеющейся информацией об объекте.

Иерархическая организация, конечно, не является исключительной особенностью сельского хозяйства – такой подход к структурированию приложим к самым разнообразным системам – коммерческим предприятиям, комплектам компьютерных программ, социальному устройству, электронному оборудованию и т. п.

Объекты, принадлежащие каждому структурному уровню, могут рассматриваться и как системы, образованные из подсистем (объекты более низких уровней), и как подсистемы, входящие в состав некоторой системы (объект более высокого уровня).

Для иерархических систем характерны три важных свойства:

1) каждый уровень иерархии имеет свой собственный язык, свою систему концепций или принципов;

2) на каждом уровне иерархии происходит обобщение свойств объектов более низких уровней. Закономерности, обнаруженные и описанные для по-

следних, могут быть включены в объясняющую (функциональную) схему, обретая при этом связь с объектом высшего уровня. Таким образом, описание на уровне  $i$  способствует объяснению (пониманию) явлений, имеющих место на уровне  $i-1$ ;

3) взаимосвязи между уровнями не симметричны. Для нормального функционирования объектов высшего уровня необходимо, чтобы успешно «работали» объекты более низкого уровня, но не наоборот.

Однако главная задача при этом – выбрать компоненты системы таким образом, чтобы каждому из них была присуща относительная автономия, то есть, чтобы внутренние связи в пределах каждой подсистемы были сильными, а взаимодействия между подсистемами – слабыми. Обычно решающим оказывается то обстоятельство, что подсистемы, подлежащие рассмотрению, должны быть хорошо изучены и описаны.

## 1.2. Иерархия энергетических систем

В настоящее время энергетика существует в виде большой и сложной целенаправленной управляемой системы. Обычно под *системой* понимают то, что определенным образом взаимосвязано, подчинено общим целям и законам, может быть описано в рамках структуры, которая отражает устойчивые отношения, связи и взаимодействия между элементами и частями, объединяющими несколько элементов или частей – *подсистем*.

*Система* – целостная совокупность взаимосвязанных элементов и частей, средство достижения поставленной цели [5, 17]. Понятие *система* является многогранным и развивающимся. Элемент и часть, часть и подсистема, подсистема и система образуют диалектические противоположности категории часть и целое. Связи в системе также являются элементами, частями или подсистемами, назначение которых объединять другие элементы, части или подсистемы в единое целое, в систему. *Структура системы* – совокупность всех элементов, частей и подсистем и связей между ними обеспечивает целостность и устойчивость при различных внешних и внутренних изменениях.

Для возникновения системы необходимо выполнение трех условий:

1) объединение частей или объектов, между которыми существуют *каузальные* – причинно-следственные связи;

2) наличие методов, способов и средств, т.е. подходящих связей для объединения частей или объектов в систему;

3) появление у системы новых эмерджентных свойств, которые отдельным элементам, рассматриваемым вне системы, не присущи. *Эмерджентность* характеризует эффект организации, который является результатом возникновения между элементами усиливающих связей, проявлением закона перехода количества в качество.

Большая система энергетики состоит из отдельных взаимосвязанных подсистем, функционирующих как единое целое, но при решении самостоятельных

задач подсистемы сами становятся системами и рассматриваются отдельно [2, 3, 5, 12, 17].

Составной частью энергетики является энергетическая система. Все элементы системы функционально связаны единством генерирования, передачи и потребления электрической энергии. *Энергетическая система* (энергосистема) – совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном, процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и тепла при общем управлении этим режимом. В свою очередь и эта подсистема является иерархичной и включает электроэнергетическую систему.

*Электроэнергетическая система* (ЭЭС) – та часть энергетической системы, в которой теплота и различные виды энергии преобразуются в электрическую энергию, передаваемую на расстояние, распределяемую по потребителям, где она вновь преобразуется в другие виды энергии. Одну из основных функциональных составляющих энергосистемы выполняет ее электрическая часть. Электрическая часть энергосистемы играет роль одной из подсистем большой энергетики, которая также обладает системными признаками. *Электрическая часть энергосистемы* – совокупность электрического оборудования объектов энергосистемы [9].

Для оптимального функционирования сложной системы необходимо осуществлять управление. *Управление* – это совокупность воздействий на систему, ее части или объекты с целью достижения поставленной цели. В сложной системе управление реализуется через *принятие решений*.

Итак, ЭЭС – это находящееся в работе электрооборудование энергосистемы и приемников электрической энергии, объединенное общим режимом и рассматриваемое как единое целое в отношении протекающих в нем физических процессов. ЭЭС представляет собой совокупность *силовых элементов* – вырабатывающих, преобразующих, передающих, распределяющих и потребляющих электрическую энергию и *элементов управления* – регулирующих и изменяющих состояние системы. ЭЭС является сложной автоматизированной системой, совокупностью *управляемого объекта* и *субъекта управления* – автоматических управляющих устройств, где часть функций управления (наблюдение за работой автоматических устройств, изменение при необходимости программы их работы, принятие решений по управлению в изменившихся или сложных ситуациях) выполняет человек. Обязательное присутствие человека в системе управления, характеризует ее как *эргатическую*.

С целью выбора управляющего воздействия на систему предварительно необходимо проанализировать возможности и последствия разных действий. Такая возможность предоставляется при использовании моделей ситуации. Осуществление моделирования требует затрат определенных ресурсов, как правило, ограниченных. В зависимости от различия в удовлетворении потребности моделирования в ресурсах конкретизируются понятия *больших* и *сложных систем*. При моделировании, например на ЭВМ, ограничены ресурсы объема памяти и скорость решения задач большой размерности в реальном време-

ни. Системы, моделирование которых затруднительно вследствие их размерности, называются *большими* [17].

Имеющаяся о системе информация предстает в виде той самой модели, об использовании которой идет речь. Признаком простоты системы является успешность управления, т.е. *достаточность* информации для управления. Но если полученные с помощью модели управления результаты приводят к неожиданным, непредвиденным или нежелательным последствиям, отличающимся от предсказанных моделью, это характеризуется как *сложность* системы и объясняется недостаточностью информации для управления.

Обычно система состоит из элементов с внутренними и внешними связями. Если учитывать только двусторонние внутренние одномерные связи между элементами, то общее число связей выражается квадратичной зависимостью числа управляемых переменных от количества элементов системы. Обеспечение требований по качеству связей предполагает возможность выбора номинальных значений для каждой управляемой переменной, поэтому число управляемых переменных с учетом возможностей выбора эталонов еще более возрастает. Число способов управления объемом информации, переносимой сигналами, растет как квадратичная функция количества используемых сигналов. В сложных системах такой объем информации в процессе управления переработать практически невозможно.

*Сложной системой* называется система, в модели которой не хватает информации для эффективного управления. Из-за влияния неопределенных в полной мере и случайных факторов на сложную систему модель ее управления неадекватна заданной цели, поэтому большую систему электроэнергетики определяют как сложную систему.

В сложных системах выделяются специфические контуры управления, по которым циркулируют потоки информации: исходной – от элементов системы к управляющим устройствам и управляющей – от управляющих устройств к элементам системы.

Сложным системам свойственны в той или другой степени черты самоорганизации. Система называется *самоорганизующейся*, если она способна на основании оценки воздействий внешней среды, путем последовательного изменения своих свойств прийти к некоторому устойчивому состоянию, когда воздействия внешней среды окажутся в допустимых пределах. Самоорганизация системы связана с ее *адаптацией*, приспособлением к условиям окружающей среды. Развитие системы, изменение во времени ее состояния свидетельствует о ее *динамичности*.

Следовательно, основными отличительными признаками сложных систем электроэнергетики являются:

- 1) большое количество организованных и управляемых частей и элементов, эргатичность;
- 2) сложность и многовариантность функций, выполняемых системой и направленных на достижение общей цели функционирования;
- 3) возможность разбиения системы на подсистемы – цели, функционирование которых подчинено общей цели функционирования всей системы;

- 4) иерархическая структура управления, разветвленная информационная сеть и потоки информации;
- 5) взаимодействие с внешней средой и функционирование в условиях воздействия случайных факторов и неполноты информации;
- 6) самоорганизация, адаптивность и динамичность.

### **1.3. Принятие решений при управлении сложными системами**

В основе управления сложными системами заложено постоянное решение множества вопросов, задач, проблем. Выработка и принятие решения относится к информационным процессам, связанным с переработкой субъектом управления информации об окружающей среде, состоянии объекта управляемой системы, накопленного опыта и знаний, которые заканчиваются волевым, творческим действием лица, принимающего решение (ЛПР) – принятием решения [2–4, 10, 18].

Присутствие в процессе управления субъекта – ЛПР вносит в процесс формирования и выбора рациональных решений обогащенный применением объективных математических методов элемент субъективизма. Понимание субъективной природы решений способствует поиску путей обогащения возможностей и способностей ЛПР. К этому привлекаются математические и экспертные модели и методы, позволяющие достичь в решении оптимального сочетания субъективного и объективного.

Принятие решения характеризуется следующей ситуацией:

- 1) наличием проблемы – цели, необходимой для достижения;
- 2) наличием участников процесса принятия решения, несущих ответственность за принятое решение;
- 3) наличием альтернатив выбора линий поведения. Если выбора нет, то решение не требуется и predetermined действия могут быть выполнены автоматически;
- 4) риском и неопределенностью использования различных альтернатив, с которыми связана вероятность достижения цели. Риск и неопределенность являются частыми, но не обязательными чертами ситуации принятия решения;
- 5) присутствием ограничений на значения показателей, которыми описывается альтернатива, один из вариантов решения. Наличие ограничений, как правило, затрудняет достижение поставленной цели.

Выявление всех элементов ситуации должно предшествовать непосредственному принятию решения.

Процесс принятия решения – это уникальное многоплановое явление с присущими ему закономерностями и особенностями. Во-первых, это информационный процесс, связанный с переработкой информации субъектом управления. ЛПР на основе знания основных закономерностей функционирования объекта управления, анализа и оценки информации об окружающей среде, состоянии управляемой системы и предшествующего опыта вырабатывает новую ин-

формацию в виде решения. Во-вторых, это волевое, творческое действие ЛПР, которое завершает психологический процесс отражения действительности интеллектом субъекта управления, где доводы находятся на одном уровне с эмоциями, а логика с интуицией.

Рациональное решение зависит от накопленного ЛПР опыта и обосновывается объективным анализом с применением количественных и качественных математических методов. При этом в описании вариантов решения используется структурированное множество показателей, а для выбора оптимального решения – набор критериев.

Реализация всевозможных вариантов решения обычно связана с различными последствиями. Для оценки вариантов решения используются критерии эффективности. Вариант считается оптимальным, если обеспечивается максимизирующее значение функции при заданных ограничениях или минимизируются ресурсы для достижения заданного значения целевой функции.

Технология принятия решения представляет собой структуру выбора направления и способов действия для достижения цели и состоит из следующих основных стадий:

- 1) формирование подмножества вариантов решения из всего множества, универсума возможных решений;
- 2) прогнозирование развития событий в окружающей среде и результатов функционирования системы в произвольный момент времени в будущем;
- 3) построение модели функционирования системы в условиях окружающей среды и использование ее для прогноза последствий решения;
- 4) сравнение ожидаемой полезности разных вариантов многокритериального решения;
- 5) выбор наилучшего варианта решения из сформированного подмножества при наличии противоречивых оценок по нескольким частным критериям;
- 6) составление плана конкретных действий на основе прогноза развития обстановки, в которой план будет исполняться.

Процесс выработки и принятия решения заключен в нескольких типичных этапах:

- 1) уяснение задачи, оценка оперативной обстановки, выполнение расчетов, обоснование замысла и решения;
- 2) принятие решения, его оформление, доведение до сведения непосредственных исполнителей;
- 3) разработка плана и необходимых документов, регламентирующих выполнение принятого решения, утверждение плана;
- 4) контроль исполнения решения, анализ и обобщение опыта.

Процесс выработки и принятия решения может быть циклическим, итерационным и содержать повторяющиеся действия. Итерации, как правило, необходимы для получения новой или уточненной информации.

## 1.4. Особенности системы электроснабжения

Анализ свойств объекта управления сложной электрической системой осуществим на одной из ее подсистем – системе электроснабжения (СЭС) крупного предприятия (рис. 1.2), также являющейся сложной системой. Для этого воспользуемся методологией, терминами и определениями системного анализа [2, 3, 12, 17], представляя СЭС как проблемосодержащую систему предметной области.

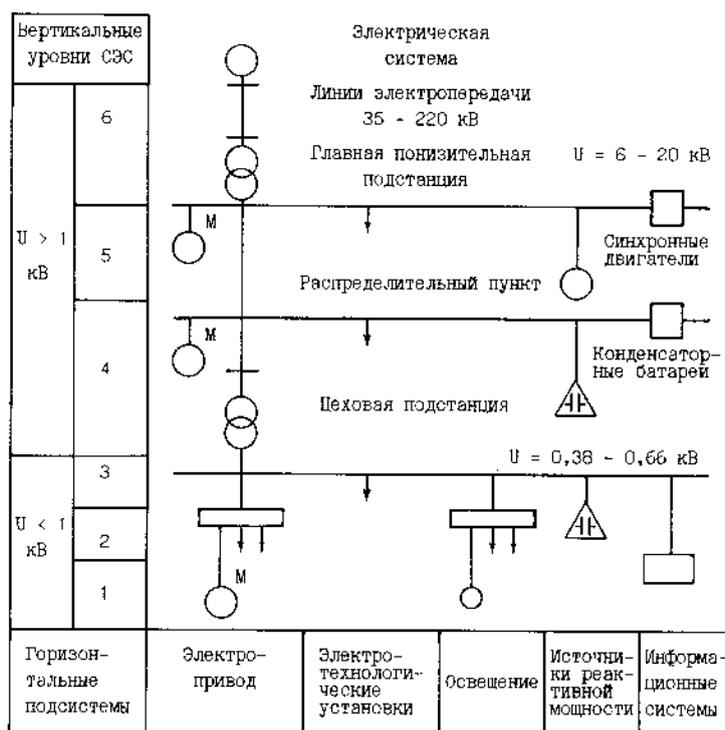


Рис. 1.2. Иерархия уровней-подсистем системы электроснабжения:  
1–6 – уровни электрических нагрузок

В СЭС района или крупного предприятия первоначально выделяются две подсистемы:

1) объект управления (подсистема исполнения решений – совокупность технологически взаимосвязанных производственных объектов и агрегатов, электроустановок, материальных ресурсов и производственного персонала);

2) субъект управления (подсистема принятия решений – АСУЭ: управление отделом главного энергетика производственно-хозяйственной деятельностью своих подразделений; подразделений оперативно-диспетчерского управления; средств автоматики и телемеханики). С точки зрения субъекта предметом управления являются информационные процессы, происходящие в контролируемой области.

СЭС района или современного предприятия представляет собой совокупность иерархически организованных различных по характеру подсистем. Ядром

является технология или технологический процесс. Подчинены технологии электроприемники потребителей. Связывающее звено в иерархии от источников питания и электрической системы до электропотребителей образуют линии электропередачи, трансформаторные подстанции, преобразователи, источники реактивной мощности. Подсистемы СЭС связаны между собой как технологией, так и единством передачи, распределения, преобразования и потребления электрической энергии. Поэтому СЭС является подсистемой всего промышленного комплекса.

Цель рассматриваемой системы установлена в определении СЭС как совокупности электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией, осуществляющих производство, преобразование, передачу, распределение, потребление и превращение электрической энергии в другие виды энергии.

Уровни-подсистемы СЭС имеют вертикальную и горизонтальную структуру (рис. 1.1).

*Вертикальные уровни.* В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [19] все электроустановки принято делить на два уровня напряжением  $U$  до 1 кВ и выше. При определении электрических нагрузок СЭС представляется иерархической системой: 1 – отдельные электроприемники; 2 – группы электроприемников; 3 – шины цеховой подстанции напряжением 0,38–0,66 кВ; 4 – шины распределительного пункта напряжением 6–20 кВ; 5 – шины главной понизительной подстанции напряжением 6–20 кВ; 6 – граница раздела промышленного предприятия и энергосистемы.

*Горизонтальные подсистемы* (назначение электроприемников) включают электропривод, электротехнологические установки, электрическое освещение, источники реактивной мощности, устройства для сбора и обработки информации, а также устройства управления.

Практически все используемые уровни напряжений до и выше 1 кВ переменного и постоянного тока опасны для жизни людей. Опасность электрического тока в отличие от прочих опасностей усугубляется быстротечностью поражения и тем, что человек не в состоянии без специальных приборов дистанционно обнаружить напряжение. Промышленная частота переменного тока 50 Гц является одной из наиболее опасных частот для поражения людей. Действующие электроустановки являются источниками шума, ультразвука, инфразвука, вибрации, окружены электрическими, магнитными и электромагнитными полями, представляют опасность возникновения пожара и взрыва.

СЭС обеспечивает бесперебойное электроснабжение в пределах допустимых показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и исключения опасных для жизни людей и окружающей среды ситуаций при соблюдении условий безотказности, долговечности, устойчивости, управляемости, безопасности, ремонтпригодности и избыточности входящих элементов. На практике надежность СЭС обеспечивается техническими и организационными мероприятиями (дублированием элементов, их функций, подсистем, использованием при управлении избыточной информации, совершенствованием конструкций, материалов и

операций технического обслуживания, снижением продолжительности аварийных ремонтов, совершенствованием систем контроля и управления).

СЭС ухудшает состояние окружающей среды за счет повышения концентрации вредных веществ в атмосфере, воде, почве, нарушении теплового баланса, природного ландшафта, увеличении уровней шума, вибрации, напряженности электромагнитного поля и т.п. При аварийных ситуациях в СЭС перечисленные факторы многократно возрастают. Особую роль приобретают социальные последствия экологических нарушений.

В последние годы часть экологических проблем в рамках Международной конференции по большим энергетическим системам – CIGRE сформировалась в отдельное направление исследований – электромагнитную экологию. Электромагнитная экология связана с теми явлениями в электроэнергетических системах, которые оказывают вредное и опасное влияние на другие системы – связь, электронное оборудование, трубопроводы, живые организмы людей, животных и растений. Учитываются как сами электромагнитные процессы в электроустановках, так и последствия их влияния на окружающую среду. Основные вопросы этого направления относятся к проблемам электромагнитной совместимости (ЭМС) [8]: изучение влияния короны высоковольтных линий электропередачи и электромагнитных полей на вспомогательное электронное оборудование, линии связи, протяженные металлические сооружения и низковольтные линии электропередачи.

Экономичность функционирования СЭС (минимум затрат и максимум эффекта) достигается путем оптимального соотношения между затратами на оборудование и технико-экономическими последствиями нарушения требований к обеспечению электроснабжения. Оптимальное соотношение находится в результате сопоставления нескольких возможных технических решений и выбора наиболее целесообразного варианта воплощения.

Взаимное влияние электрооборудования, связанного электрической сетью в СЭС, породило комплекс проблем ЭМС. Нарушение ЭМС проявляется в экономическом ущербе, ухудшении ПКЭ и коэффициента мощности, увеличении нагрева элементов и потерь мощности в сети и самом электрооборудовании, возникновении резонансных явлений, ухудшении диэлектрических свойств изоляционных материалов, сокращении срока службы и надежности элементов СЭС, уменьшении полезной мощности электроприемников, сбоях в работе, нарушениях нормальных режимов электро- и технологического оборудования, влиянии на автоматику, линии связи, информационные потоки. Главным техническим аспектом нарушения ЭМС является связанность всех элементов СЭС. Искажения и помехи со стороны низшего напряжения проникают в сети среднего и высшего напряжения, сети других потребителей и влияют на работу всего электрооборудования. Внедряется принципиально новое электрооборудование, которое можно разделить на помехочувствительное (электронная и цифровая техника, являющаяся главным элементов средств автоматики, вычислительных машин и информационных систем) и производящее помехи (силовая полупроводниковая техника, электроустановки с элегазовым оборудованием, лазерные принтеры и персональные компьютеры, потребители, имеющие бес-

трансформаторные схемы выпрямителей с емкостным сглаживанием пульсаций и другие установки). Неожиданные физические эффекты оказывают отрицательное воздействие, например, выпрямление переменного тока окислами проводников в местах электрического контакта. Недостаточна приборная база для выявления, контроля и диагностики искажений и помех.

СЭС обладают рядом свойств (присущих большим и сложным искусственным человеко-машинным системам кибернетического типа), которые можно разделить на общие, структурные и режимные.

*Общие свойства СЭС:*

- иерархичность системы показателей;
- неожиданность, необъяснимость, уникальность и случайность поведения, т.е. нехватка информации для ее управления по единой модели, адекватной заданной цели. Поэтому для каждой подсистемы или группы ее элементов используется собственная модель;
- эмерджентность, целостность обладания качествами, отсутствующими у отдельно взятых ее частей;
- состояние СЭС в любой момент времени не определено системой показателей достаточно точно. Возникает парадокс: чем больше детерминированных параметров и точнее каждый из них, тем менее точен образ-характеристика описываемой системы;
- управляемость параметров режима и параметров системы, с помощью изменения которых СЭС способна изменять внутренние параметры;
- наблюдаемость, заключающаяся в том, что внутренние параметры системы связаны, по крайней мере, с одной, позволяющей их анализировать, выходной величиной;
- идентифицируемость состояний СЭС, способствующая выявлению нужной информации для контроля и управления как отдельными элементами и группами, так и всей СЭС;
- вероятностная предсказуемость (неопределенность, нечеткость) позволяет, используя коэффициент определенности или функцию принадлежности [11, 14], представить описание поведения СЭС на некотором временном интервале будущего;
- прогнозируемость как составная часть планирования дает возможность судить о состоянии СЭС в будущем или о путях и сроках достижения планируемых состояний;
- кибернетическая моделируемость, подразумевающая рассмотрение СЭС в виде преобразователя, имеющего входы и выходы. Например, при моделировании СЭС ее моделью может быть любая другая система, в которой совершается подобное преобразование состояний входов в состояния выходов;
- целенаправленность (адаптивность, саморегулирование), проявляющаяся в способности СЭС устранять последствия внешних и внутренних воздействий для достижения необходимого состояния благодаря наличию средств резервирования, управления и автоматики.

*Структурные свойства СЭС:*

- многомерность, определяемая наличием и необходимостью измерения параметров и показателей;
- многосвязанность элементов, имеющих прямые, обратные, рекурсивные (необратимые, причинно-следственные), синергические (усиливающие), циклические, жесткие и гибкие связи;
- неоднозначность (нечеткость) структуры как различных функций каждого уровня СЭС, так и назначения каждого из элементов; дискретность физической неделимости элементов СЭС (генераторов, трансформаторов, электродвигателей и проч.) и показателей системы в целом, которые носят дискретный характер.

*Режимные свойства СЭС:*

- одновременность процессов производства (для промышленных предприятий, имеющих собственные электростанции), передачи, распределения и потребления электрической энергии;
- непрерывность всего функционального процесса в СЭС от выработки до электропотребления;
- взаимосвязь между производством и потреблением с учетом потерь в элементах СЭС;
- случайность и многообразие возмущений, что характеризует СЭС как открытую систему, связанную с внешней средой, технологическим процессом, атмосферными воздействиями и проч.;
- динамичность изменения во времени параметров режима и системы;
- наблюдаемое соответствие между физическими и информационными процессами.

Режимы СЭС подразделяются на *установившиеся и переходные*. Внутри этих групп различаются нормальные, утяжеленные, аварийные и послеаварийные виды режимов.

В *нормальном* режиме работают все необходимые элементы СЭС, ПКЭ не должны выходить за пределы максимальных значений, указанных в ГОСТ 13109-97 [8], при этом в течение не менее 95 % времени каждых суток ПКЭ должны находиться в пределах нормальных значений. Разброс параметров в результате «дыхания» системы – нечеткость (размытость) параметров находится в пределах, установленных [5].

В *утяжеленном* режиме появляется повышенная опасность дальнейших ухудшений параметров режима и системы.

При *аварийных* нарушениях электроснабжения допускается кратковременный выход значений ПКЭ за установленные максимальные границы с последующим восстановлением до границ послеаварийного режима.

В *послеаварийном режиме* СЭС происходит изменение параметров системы, а параметры режима характеризуются значениями ПКЭ, не выходящими за максимальные границы, установленные ГОСТом [8].

Особую опасность для СЭС представляют аварийные режимы [3, 5, 12], последствия которых отражаются на других промышленных подсистемах и окружающей среде. При высокой скорости протекающих процессов ликвида-

ция аварий возможна только с помощью быстродействующих устройств системной автоматики.

Последствиями аварий в зависимости от тяжести являются: ухудшение условий электробезопасности; понижение надежности электроснабжения; нарушение технологии производства; загрязнение окружающей среды; тяжелые социальные последствия экологических нарушений; перегрузка неповрежденных элементов; нарушение устойчивости работы и, как следствие, возможность каскадного характера развития аварийного процесса; материальный ущерб от простоев, недовыпуска продукции, увеличения потерь, повреждения агрегатов, ухудшения параметров СЭС и ее элементов; изменение конфигурации схемы электроснабжения.

Причинами аварийных режимов являются: случайные факторы; нарушения нормальных режимов, работоспособности и разрушения элементов СЭС; развивающиеся дефекты, которые не могут быть выявлены в промежутках между плановыми ремонтами; отказы исполнительных механизмов; сложность и территориальная распределенность СЭС; инерционность и неадекватность управления; поступление ложной информации и отсутствие информации о реально происходящих процессах. Для оптимального осуществления нормальных режимов, предупреждения аварийных ситуаций, а также быстрого устранения их последствий нужны сложные системы автоматического и автоматизированного управления, что требует системного рассмотрения и анализа субъекта управления.

## **1.5. Особенности автоматизированного управления в СЭС**

Наибольшее развитие в энергетике получили автоматизированные системы управления – АСУ производственными энергетическими объединениями – предприятиями для диспетчерского, производственно-технического и организационно-экономического управления [2–4, 6, 12]. Входящие в состав АСУ производственных энергетических объединений структурные единицы: электростанции, электрические и тепловые сети, СЭС крупных промышленных предприятий, имеют собственные АСУ, реализующие информационные, управляющие и вычислительные функции. Крупные промышленные предприятия, потребляющие в большом количестве различные виды энергии, имеющие развитое и сложное энергетическое оборудование, создают автоматизированные системы управления энергоснабжением – АСУЭнерго (АСУЭ) [2, 6].

АСУЭ состоит из двух основных подсистем – автоматизации управления СЭС и автоматизации управления основным энергооборудованием промышленного предприятия. Вторая подсистема подчиняется технологии производства – АСУТП, но согласовывает с энергодиспетчером основные управляющие решения, связанные с эксплуатацией присутствующего электрооборудования. В связи с этим обстоятельством, а также учитывая, что подсистема АСУЭ СЭС по сравнению с системами, предназначенными для автоматизации обеспечения другими видами энергии, наиболее полно отвечает предъявляемым к автомати-

зированным системам управления требованиям, в дальнейшем изложении остановимся на ней.

АСУЭ характеризуется [2, 4, 6] наличием системы автоматизированного сбора и обработки информации; необходимостью выработки и использования в управлении информации, получаемой расчетным путем; возможностью частичного автоматического управления; применением математических методов управления на базе управляющих ЭВМ; автономностью входящих в нее подсистем, имеющих самостоятельные цели управления и общую цель, единую для всей АСУЭ; наличием внутренних и внешних связей у каждой подсистемы; уплотнением информации при восходящем иерархическом движении; необходимостью согласования целей, критериев управления, процедур кодирования и обработки информации между отдельными подсистемами как в пределах самой АСУЭ, так и с подсистемами производства – АСУП и технологических процессов – АСУТП. Система ЛПР – ЭВМ обеспечивает достаточно эффективное функционирование объекта, когда сбор и переработка информации, необходимой для реализации функций управления, осуществляется с применением методов и средств автоматизации и вычислительной техники. Все АСУ имеют техническое, математическое, программное, лингвистическое, информационное, организационное и правовое виды обеспечения.

В энергосистеме и ее подсистемах, ЭЭС и СЭС субъектом в управлении сложными процессами является диспетчер – ЛПР [4, 6]. ЛПР обычно работает в условиях ограниченности времени для анализа большого объема поступающей оперативной информации, часть из которой может быть неполной. В процессе решения задач диспетчерского управления ЛПР выполняет функции: планирования и контроля, выработки регулировочных воздействий и устранения нарушений контролируемого процесса, мониторинга и диагностики системы.

Нередко возникают проблемные ситуации, когда проявляется противоречие между запланированным и реальным ходом контролируемого процесса, а у ЛПР отсутствует четкое представление о том, что нужно делать для ликвидации возмущений в системе. Возникновению подобных ситуаций способствуют и специфичные для диспетчерского труда условия: эмоциональный фон, порожденный огромной ответственностью за результаты деятельности, а также недостаток времени на принятие решения. Под влиянием отрицательного эмоционального состояния и высокого темпа принятия решений у ЛПР иногда выпадают из памяти нужные ему инструкции решения подобных задач, поэтому он вынужден конструировать их вновь.

Структура деятельности диспетчера-ЛПР основана на оперативном мышлении. Прежде чем отреагировать на проблемную ситуацию, ЛПР мысленно представляет элементы, из которых складывается ситуация, затем приводит в движение образы этих элементов и на основе такого перемещения представляет совокупности будущих действий. Диспетчер учитывает большое количество как взаимосвязанных, так и противоречивых факторов. Он должен принимать решения в условиях отсутствия четких критериев их оценки.

Принятие и реализация управляющих воздействий решаются тем сложнее, чем сложнее объект управления, чем больше управляемых параметров и связей между ними. В АСУЭ связи между параметрами значительно усложнились, они стали менее определенными. В этих условиях возникает альтернативность возможных решений со своими положительными и отрицательными сторонами, что затрудняет однозначность окончательного выбора. Жесткость предъявляемых к СЭС требований, заключающихся в обеспечении безопасности, надежности, экологичности, экономичности и ЭМС, вызывает необходимость автоматизированного управления жизненным циклом всей системы. С позиции субъекта управления СЭС имеет непрерывный характер управления, осуществляемый как с помощью средств системной автоматики, так и АСУЭ.

Задачами системной автоматики является управление при электромагнитных и электромеханических переходных процессах с помощью устройств релейной защиты и автоматики.

СЭС связана с АСУЭ информационной подсистемой, которая обеспечивает сбор и регистрацию значений параметров режима и системы для последующего адекватного управления. Управление в автоматизированном режиме осуществляется дистанционно периодически с помощью команд. Постоянно производится передача измеренной информации к АСУЭ для оценки функционирования СЭС. Кроме набора показаний контрольно-измерительных приборов выделяется визуальная информация, которая не фиксируется приборами, а поступает от специалистов, наблюдающих за объектом. В общем случае вся объективная и субъективная информация характеризует определенные параметры режима и системы. В результате оценки информации по мере необходимости ЛПР принимает решения о характере и силе управляющих воздействий, которые оперативно передаются для реализации в нужном месте.

Имеется ряд задач оперативного управления параметрами режима и системы, интерпретации, мониторинга и диагностики состояния СЭС и ее элементов, проектирования, а также планирования, в принятии решений, по которым необходимо присутствие человека. Решение перечисленных выше задач осуществляется в диалоге ЛПР – ЭВМ и не может быть пока полностью автоматизировано по следующим причинам [1, 4, 13, 20]:

- неопределенность полной совокупности параметров при оценке состояния объекта и, как следствие, отсутствие четкого интегрального критерия;
- большое количество факторов, влияющих на состояние объекта, в том числе таких, которые не имеют количественного выражения;
- сложная связь между влияющими на работу факторами, часто неявная и неоднозначная, трудно формализуемая, плохо структурируемая;
- недостаточная информация о параметрах СЭС и влияющих на них факторах;
- построение математической модели СЭС затрудняет высокая связанность процессов, протекающих в различных подсистемах, группах и отдельных элементах. По этой причине модель СЭС должна включать не только модели отдельных групп и элементов, но и модели, описывающие их взаимодей-

ствие между собой. В результате математическая модель оказывается очень громоздкой и трудно реализуемой;

- реализация многих моделей требует большого ресурса вычислительных средств;

- реальный процесс диагностирования состояния СЭС является прерогативой специалистов высокого класса – экспертов, обладающих высокой степенью компетентности в соответствующей узкоспециальной области. ЛПР может исходить в своих рассуждениях не из самих результатов измерений, а из тенденций, качественных оценок или структуры этих измерений.

Эффективное функционирование АСУЭ основано на предъявляемых к ней требованиях [1, 2, 6]. Это наличие оперативного управления в реальном времени, комплексность, многоуровневость и четкость иерархии управления, высокая надежность и программная совместимость с другими АСУ. Задачей управления АСУЭ является необходимость воздействовать как на СЭС, так и взаимодействовать с внешними системами, чтобы эффективно обеспечить основные и вспомогательные производства промышленного предприятия необходимым количеством электроэнергии надлежащего качества. В АСУЭ управление смещается из области стабилизации основных электроэнергетических параметров и автоматизации повторяющихся операций в область решения задач оптимального управления и эксплуатации.

Практика эксплуатации промышленных СЭС показывает, что при утяжеленных, аварийных, послеаварийных или динамически развивающихся переходных режимах работы особенно проявляется нечеткость и неполнота в информации, необходимой для автоматизированного принятия адекватного текущей ситуации управляющего решения. Существующие автоматизированные системы АСУЭ резко снижают свою работоспособность в подобных условиях. Возникает опасность для жизни людей и предприятия.

Действенным средством автоматизации обеспечения жизненного цикла промышленного электроснабжения стали ЭВМ новых поколений. Но наличие даже самых современных ЭВМ не является достаточным условием для успешного функционирования АСУЭ. Для этого требуются более совершенные методы организации и соответствующие им средства управления.

## **1.6. Анализ причин неопределенности информации в ЭЭС**

Проблема автоматизированного принятия решений в СЭС и ЭЭС связана с выбором альтернатив в условиях неопределенности имеющейся информации [1, 10, 13–17, 18, 20]. Неопределенность информации проявляется как неопределенность составляющих – знаний и данных. Причины неопределенности выразим в виде дерева (рис. 1.3).

На первом иерархическом уровне неопределенность классифицируем триадой: неопределенностью природы явлений в предметной области, выражаемой через неизвестные факторы; неопределенностью характера поведения предметной области, результаты действия которой нельзя полностью учесть и предсказать; неоднозначностью собственных целей управления, вследствие то-

го, что перед ЛПР стоит сразу несколько целей, которые одним, даже интегральным критерием выразить невозможно.

На верхнем уровне дерева неопределенность образована тремя главными причинами, характеризующими количество недостающей информации о составляющих элементах ЭЭС. Во-первых, сложностью ЭЭС – неполнотой и недостаточностью знаний. Неопределенность общих знаний обнаруживается в неполноте имеющихся знаний о состоянии как ЭЭС, так и всей предметной области, входящей в энергосистему, недостаточной изученности сложных процессов, отсутствии полного осмысления структуры сложной системы и всех механизмов взаимодействия между подсистемами и отдельными элементами. Неопределенность конкретных знаний характеризуется во-первых: многосвязностью данных, когда одни функциональные отклонения проявляются в симптомах других изменений; недостатком статистического материала о неопределенных параметрах; случайным характером изменения параметров; зашумленностью данных.

Во-вторых, нечеткостью ситуации, которая вызвана недетерминированным характером нагрузки и показателей качества электроэнергии, наличием качественной и субъективной информации, характеризующей параметры ЭЭС. Источниками неопределенности такого рода могут быть: невозможность точного измерения параметров режима и параметров системы; неточность исполнительских действий; невозможность полного и четкого описания многих элементов ЭЭС и ситуаций; недостаточность учета влияющих факторов, несвоевременность поступления информации. В-третьих, присутствующей в информации нечеткости, которая связана с отсутствием точных границ областей определения и свойственна большинству понятий.

Типы источников возникновения неопределенной информации в информационных видах обеспечения АСУЭ также довольно разнообразны. Первый тип связан с надежностью информации – неопределенность может присутствовать в фактическом знании. Второй тип обусловлен неточностью языка представления правил принятия решений, так как, если правило не выражено на формальном языке, его значение не может быть выражено точно. Третий тип возникает, когда принятие решения основано либо на неполной информации, либо при синтезе правил принятия решений, полученных из различных источников или от разных экспертов.



Рис. 1.3. Классификация причин неопределенности информации, возникающих при решении задач предметной области

Анализ информационной базы ЭЭС и особенностей АСУЭ показывают, что, переходя к разработке систем, осуществляющих автоматизированное управление, приходится развивать формальный механизм преобразования информации, приближающийся по своим возможностям к процессу понимания явлений человеком. Углубляя исследования в этом направлении, становится все более очевидным, что необходимая для разрабатываемых систем информация все больше отходит от объектов, которыми оперирует традиционная математика. Используются не только числовые, но и лингвистические модели рассуждений специалистов. Если традиционные методы предъявляют требования приближения к реальности, согласования со средой, обеспеченности вычислительными ресурсами, конечности, адекватности, однозначности, точности, полноты, замкнутости, непротиворечивости и др., то во многих утяжеленных режимах ЭЭС или близких к ним экстраординарных условиях большинство из этих требований выполнить невозможно.

Общим термином, характеризующим неопределенность информации, было предложено понятие НЕ-фактора [13]. Основной чертой различных по природе факторов информации, является то, что каждый из них отражает компонент модели понимания, проявляясь в виде содержательного и лексического отрицания классических свойств формальных систем: полноты, определенно-

сти, достоверности и т.п. НЕ-факторы представляют собой явления одного порядка и отражают различия между сложной реальной системой и ее моделью.

Второй уровень дерева указывает общие причины неопределенности информации в предметной области ЭЭС: неизвестность, неадекватность, недостоверность. В ситуации неизвестности, например, на первых стадиях формулирования проблемы имеются математическая неопределенность и трудности описания, когда еще не выработаны требования к критериям оценки – многовариантность, а также неизвестны требования заказчика или возможности исполнителя – неопределенность предпочтений, информация о задаче практически отсутствует. При сборе данных на первом этапе, временно прекращенном в связи с нехваткой нужных для сбора информации ресурсов, может оказаться, что собранная информация обладает недостоверностью, поскольку имеются еще не все возможные сведения. В этом случае проявляется неполнота, если получена не вся необходимая информация, то – недостаточность. Когда для некоторых элементов ЭЭС определены не их однозначные описания, а лишь множества, которым эти описания принадлежат, это – недоопределенность. Ряд элементов задачи в какой-то период времени может быть описан лишь приблизительно – неадекватно по грубой аналогии с уже решавшимися типовыми задачами. Но при продолжении исследований эти составляющие недостоверности могут быть устранены. Дальнейшая обработка информации, возможно, приведет либо к однозначному описанию элементов, либо неоднозначному, когда собрана возможная информация, но полного описания нет, и оно не может быть получено этим путем.

Следующий третий уровень дерева раскрывает конкретные причины возможной неполноты описания, оказывающие влияние на субъект управления со стороны внешней среды: физической и математической неопределенности, а также лингвистической неопределенности профессионального языка. Математическую интерпретацию исходной и обрабатываемой информации классифицируем по виду ее существующего представления: детерминированная, вероятностная и нечеткая (размытая).

Детерминированными являются параметры, значения которых либо точно известны, либо вероятностные величины обладают пренебрежительно малой дисперсией. Но в процессе принятия решения детерминированная величина, представляемая точкой на числовой оси, может быть также неопределенной по причинам отсутствия контекста, в котором она существует. Это возможно при отсутствии качественных сторон описания. Результат приводит к нестабильности существования даже при нормальных режимах, например, применяемое в проектировании номинальное значение напряжения в условиях эксплуатации не является стабильной величиной питающего напряжения из-за постоянного корреляционного изменения других параметров режима.

Для более полного представления параметров режима в процессе функционирования ЭЭС вводятся интервалы параметров режима в виде допустимых областей определения, например, показатели качества электроэнергии для нормального и послеаварийного режимов. Однако интервал также является достаточно грубой моделью представления информации.

С целью повышения гибкости интервальной оценки модели могут, например, использоваться функции распределения случайной величины в рассматриваемом интервале. Принятое решение в этом случае должно учитывать фактор риска. Другой путь уточнения модели проходит через представление параметров режима в виде множеств. При этом все элементы множества обладают общими свойствами, но предлагаемые варианты принимаемых решений являются равноценными, поэтому для выбора оптимального решения необходима дополнительная информация.

Более точный учет взглядов и суждений о моделях ЭЭС дают нечеткие множества (НМ) – элементы множества обладают общим свойством, но в различной степени. Функция принадлежности НМ является способом формализации контекста существования множества показателей; изображает гипотезу субъективного представления ЛПР об особенностях процесса управления, о характере ограничений и целей решения; описывает способ оценки альтернатив; расширяет входную информацию, переходя к ее представлению от числовой оси к плоскости. Подобная информация в большинстве экстраординарных случаев остается единственной, характеризующей процессы в ЭЭС.

Физическая неопределенность связана как со стохастической неопределенностью – случайностью, так и с погрешностью измерений физическими приборами – неточностью. Однако физическая неопределенность предполагает знание законов распределения вероятностей в обоих случаях. Здесь также присутствует и нечеткость, связанная с качественными характеристиками самой информации.

Лингвистическая неопределенность профессионального языка порождается множественностью и неопределенностью значений слов – полисемией и неоднозначностью смысла фраз. В полисемии обозначаемые одним и тем же словом объекты различны, например, в ПУЭ [19] в ст. 1.2.8 говорится об электроприемниках первой категории как «... с особо сложным непрерывным технологическим процессом, требующим *длительного* времени на восстановление рабочего режима ...», а в ст. 1.3.2 говорится, что «допустимые *длительные* токи ... выбираются в зависимости от ...». Если аналогичные описания не сходны, то это – омонимия, но если они сходны, то это – нечеткость. Рассматриваемый термин *длительный* для обозначения продолжительности процесса весьма приблизителен, поскольку в первом случае время восстановления рабочего режима зависит от продолжительности ремонта поврежденного оборудования, а во втором случае длительность связана с теплофизическими и режимными характеристиками проводников электрооборудования и электроустановок.

Источником многозначности смысла фраз является синтаксическая, семантическая и прагматическая неоднозначность. При синтаксической неоднозначности уточнение синтаксиса предложения позволяет понять смысл фразы, например, «*Уменьшить потери, слегка изменяя напряжение*» и «*Уменьшить потери слегка, изменяя напряжение*». При семантической неопределенности отдельные слова из предложения понятны, но неясен смысл всей фразы, например, постороннему мало понятен смысл происходящего процесса при передаче словесных управляющих воздействий: «еще, чуть-чуть, еще немного,

достаточно». Прагматическая неопределенность связана с неоднозначностью понимания описания текста решаемой задачи, например, «оптимизировать режим электропотребления».

Традиционные способы решения задач автоматизированного управления предъявляют к используемой информации требования неперемного приближения к реальности, четкости, однозначности, точности, полноты, непротиворечивости и др., но в экстраординарных и экстремальных условиях многие из этих требований выполнить невозможно. Если информация о СЭС имеет неопределенный характер, то в полной мере нельзя воспользоваться моделями этой системы, опираясь на теорию подобия. Однако управление высококвалифицированными специалистами осуществляется даже при такой информации, следовательно, необходимо разрабатывать и использовать модели рассуждений экспертов-ЛПР и стремиться к уменьшению неопределенности информации путем применения новых интеллектуальных методов.

Формализация нечетких данных и качественных знаний, связанная с использованием методов нечеткой математики, позволяет переходить от нечеткой символической формы представления знаний к числовым аналогам, пригодным для интерпретации в интеллектуальных системах поддержки принятия решений, основанных на эвристическом подходе в решении сложных задач с нечеткой и неопределенной входной информацией.

## **1.7. Компоненты сложной системы**

По мере постижения проблемы функционирования таких сложных систем, как ЭЭС и СЭС, становится понятной неотъемлемость для жизненного цикла решения задач их управления. Эволюция методов и средств управления этих сложных системам была связана с трансформацией развития составляющих общей проблемы функционирования энергосистемы: надежностью, оптимизацией, устойчивостью, электробезопасностью и др. Объединяющим фактором был и остается информационный аспект проблемы, поскольку все подсистемы, входящие в сложную систему, связаны единством информационного обмена. Основным решением информационного аспекта задачи управления для ЛПР является преодоление «информационного кризиса». В одних присутствующих подсистемах автоматизированного управления, например, АСУП, это избыток циркулирующей информации, в других (АСУТП, АСУЭ) – ее недостаток и неопределенность. Особенно явно это проявляется в экстраординарных режимах. В нормальных же режимах работы для ЛПР необходима дополнительная информация о работе изношенного оборудования, объем которого в ЭЭС и СЭС постоянно увеличивается, опережая темпы совершенствования АСУЭ.

Проблема информации, несмотря на нематериальность последней существует объективно, и исследователи сначала обратили на нее внимание, а затем начали познавать ее в зависимости от своих возможностей, способностей и потребностей. Проблема возникла в ходе развития используемых в энергосистеме разделов науки и техники – это наша апперцепция, осознанное восприятие не-

знания. Поскольку проблемы не рождаются на пустом месте, но вырастают из обобщения полученных ранее результатов, то существующего знания уже достаточно, чтобы указать на некоторое неизвестное из системы знания. Установление наличия неизвестного звена в проблемной области, его выделение и осмысление являются целью этого раздела.

Объектом управления рассматриваемых сложных систем (в дальнейшем систем) является электрооборудование со всеми связями. Во многих случаях имеется естественное стремление к возникновению неисправностей, старению, неустойчивой работе при внешних и внутренних возмущениях. Объект, как правило, увеличивает информационную энтропию системы.

Субъект управления представляет собой ЛПР в АСУ и персонал, который непосредственно связан с функционированием объекта. Субъект управления стремится к сохранению устойчивой, безопасной, оптимальной работы объекта без аварий и уменьшает энтропию системы.

В системе изначально присутствует и третий трансцендентальный компонент, находящийся за пределами рассмотренных определений в первом разделе. О наличии третьего системного компонента неявно говорится во многих исследованиях, например в [2, 3, 15]. Он существует, но его пока не выделяют. Он проявляется в эффективности преобразования и использования информации, циркулирующей в системе.

Рассмотрев источники неопределенности информации в предыдущем разделе, можно сделать вывод о том, что главной причиной феномена возникновения неопределенности информации является субъективная системная ограниченность. Количественная и качественная мера определенности информации зависит в конечном итоге от рассудка, мыслительных и умственных способностей субъекта управления системы, его возможности воспринимать и обрабатывать информацию. Такая характеристика третьего системного компонента, функционирующего до сих пор «по умолчанию», позволяет сделать вывод о том, что в энциклопедическом смысле рассматриваемая часть системы является ее *интеллектом*.

К третьему системному компоненту следует относить опыт, интуицию и навыки работы персонала, модели и методы, базы данных и знаний, алгоритмы и программы систем автоматизации и АСУ. Интеллектуальная системная составляющая выступает в роли «органов чувств и ума» субъекта управления. Это способность субъекта преобразовывать энергетический поток в отклик, сопровождающий взаимодействие элементов системы, в информацию. Основная задача состоит не только в этом преобразовании, но и выделении полезной информации, доведении ее до понимания субъекта. Интеллектуальная составляющая в организационном плане является арбитром, выполняющим рассуждения и исследования, средством соизмерения деятельности элементов и частей системы. Новый взгляд на интересующую нас сущность с позиций системного анализа дает возможность представить сложную систему в виде трех компонентов:

Система = Объект + Субъект + Интеллект.

Очевидно, что энергосистема, ЭЭС и СЭС как сложные технико-энергетические системы – это не только совокупность взаимосвязанных составляющих объекта и субъекта, но и обязательное эмерджентное наличие интеллекта, который помогает субъекту уменьшать энтропию системы и снижать неопределенность информации. Целью всей сложной системы (рис. 1.4) является функционирование (выполнение основных функций по обеспечению потребителей электроэнергией) и забота о собственном «здоровье» (поддержание необходимой степени организованности связей между ее компонентами, частями и элементами).

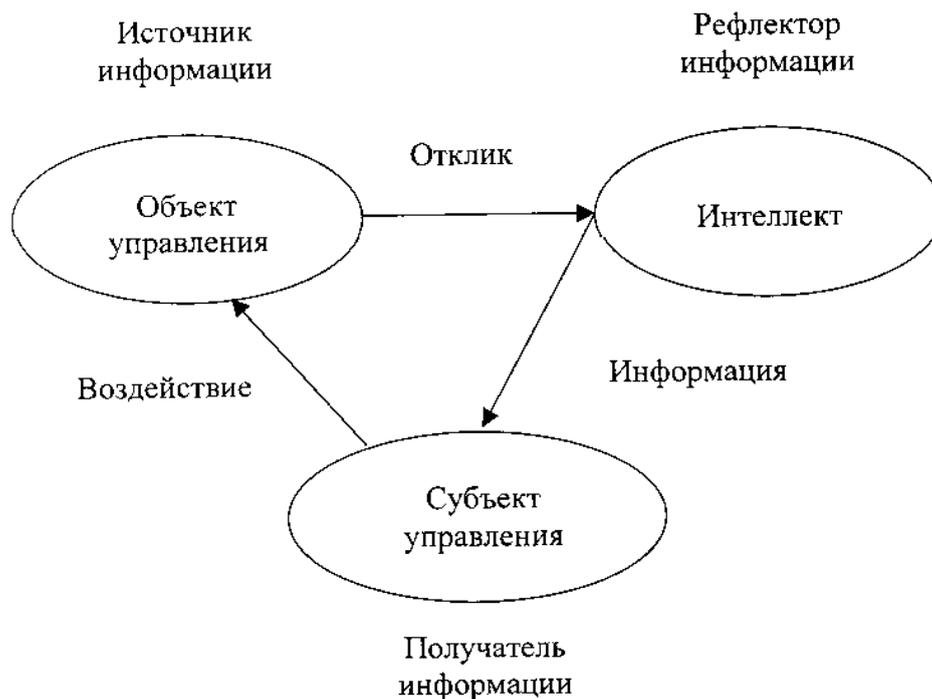


Рис. 1.4. Взаимодействие компонентов сложной системы

Интеллект в системе подразделяется на естественный (свойственный ЛПР и обслуживающему персоналу) и искусственный (выполнение с помощью ЭВМ функций моделирования человеческой деятельности).

Для ответа на вопрос о причинах «информационного кризиса», возникающего в процессе управления сложной системой, необходимо хотя бы кратко остановиться на феномене информации.

Информация определяется как отражение сущности, явления, процесса через результаты взаимодействия элементов системы [17]. Информация в электрических цепях ЭЭС обнаруживается по изменению поля (полей) в результате действия, преобразования одной формы поля в другую. Наведение ЭДС в индуктивности является результатом изменения тока в этой или другой магнитосвязанной цепи. Мощность есть результат скорости изменения энергии. Информация проявляется также через толкование происшедших изменений, последствий в элементах. Поэтому результат отражения откликов взаимодействия элементов с помощью интеллекта и есть информация согласно ее определению.

Отклик на результат взаимодействия элементов системы находится в пространстве, в котором совершается работа поля вокруг явления, ситуации, первопричины.

Напряжение, ток, мощность предстают в виде информации о функционировании электрооборудования ЭЭС и становятся параметрами режима. Сопротивления, проводимости, схемные факторы – информация о физических свойствах электрооборудования – параметры системы. Параметры режима и системы являются истолкованием, интерпретацией состояния сложной системы. Интерпретированная информация может передаваться, храниться, накапливаться в различных видах. Ее нужно только выделить, ограничить и правильно объяснить.

Поскольку функционирование объекта вызывает изменение электрических, магнитных и электромагнитных полей, а изменение полей преобразуется в информацию о функционировании объекта, то наиболее информативно объект проявляет себя в работе, в динамике, во взаимодействии с другими объектами. Все действия нарушают состояние баланса, равновесия и приводят к противодействию. В механике это описывает третий закон Ньютона – действие равно противодействию. В электротехнике это выражено в уравнениях Максвелла самоподдерживающееся распространение электромагнитных волн в вакууме. В электромеханике – это действие обратного момента в двигателе, получение в генераторе ЭДС и т.п. По противодействию мы судим о действии. Поэтому, например, авария объекта есть противодействие неправильным действиям в системе.

Одно из главных свойств информации заключено в возможности ее интерпретации, истолкования, объяснения, описания. Интерпретация предстает как вид отображения информации. Информация многогранна, многопланова, многообразна в видах ее отражения. Она присутствует постоянно, не исчезает, а переходит из одного вида в другой. При правильной, неискаженной интерпретации сути действия соответствующая информация об объекте не должна изменяться. Таким образом, информация о сложной системе предстает в следующем виде:

$$\text{Информация} = \text{Полезная информация} + \text{Информационный шум} + \text{Метаинформация.}$$

Полезная информация – информация, которая необходима (с точки зрения субъекта) для функционирования системы. Информация, которую может воспринимать субъект – функция интеллекта, совершаемая с информацией в границах восприятия субъекта.

$$\text{Полезная информация} = \text{Данные} + \text{Знания.}$$

Данные – сведения, представленные в знаковой системе на определенном носителе для обеспечения возможностей их хранения, передачи, приема и об-

работки. Абстрактная субстанция, несущая некоторую информацию. Данные, как правило, безотносительны к содержанию информации.

Знания – проверенные общественной практикой полезные сведения, которые могут многократно использоваться людьми для решения тех или иных задач.

Информационный шум – ненужная с точки зрения субъекта информация. Эта информация в текущий момент времени не может быть использована для функционирования системы. Например, функционирование силовых трансформаторов сопровождается гудением. В недавнем прошлом это воспринималось субъектом просто как вредный и бесполезный гул. В настоящее время разработаны акустические методы и средства для диагностики функционирования силовых трансформаторов. Информационный шум благодаря развитию интеллекта превратился в полезную для субъекта информацию.

Информационный шум возрастает гораздо быстрее объема полезной информации, так как интеллект развивается гораздо медленнее этого роста. Создается ложное представление о *лавинообразном* росте *всей* информации, поскольку информационный шум стал преобладать над полезной информацией. Сейчас нужно формулировать проблему иначе: не лавинообразное увеличение информации, но *катастрофическое* замедление развития интеллекта. В этом нужно искать стратегическую цель системных научных исследований.

Метаинформация – вспомогательная информация, позволяющая отделять полезную информацию от информационного шума.

HE-факторы [13] и энтропия являются функцией двух переменных – интеллекта и восприятия субъекта. Энтропия в этом случае может трактоваться как мера не отсутствия полезной информации, а как мера ограниченности, недостатка интеллекта, который не может сам воспринять или восполнить недостающую часть имеющейся информации. В действии, поведении объекта нет случайного и неопределенного. Здесь все закономерно, а случайность и неопределенность являются недостаточностью знаний о закономерном действии в системе.

Объект управления не должен подвергаться необоснованной критике за аварии и отказы, поскольку он не наделен интеллектом. Приданные искусственные системы автоматики контролируют ограниченное количество его степеней деятельности (свободы). Субъект управляет объектом, используя свойства объекта. Если специфика объекта будет применена с толком, то цель будет достигнута, субъект окажется на высоте и объект будет удобен в функционировании. Неправильное управление субъектом приводит к неоднократным сбоям, быстрому изнашиванию оборудования, опасности разрушения и авариям.

Объект обладает естественными степенями свободы деятельности, которые не являются отрицательными и непригодными параметрами, но их можно и нужно употребить с пользой. Не имея приданного интеллекта, объект может выйти за допустимые границы функционирования. Если субъект правильно использует степени свободы деятельности объекта, то и объект правильно функционирует и субъект находится вне опасности.

В исходное состояние систему могут возвращать внешние и внутренние воздействия. Компоненты системы обладают ограниченным набором возможностей, чтобы противостоять внутренним и внешним воздействиям и характеризуются параметрами режима и системы, а также параметрами состояния. Субъекту, отягощенному разными функциями, трудно достичь успеха в главном из-за проявления ограниченности возможностей «человеческого фактора». Выход из этого положения состоит в совершенствовании интеллектуальной составляющей, применении систем и технологий искусственного интеллекта, освобождающих естественный интеллект от рутинных, дополнительных и сложных функций. В этих условиях создается надстройка управления – система поддержки принятия решений: модель – метод – средство (рис. 1.5). Модель служит эквивалентом объекта управления. Метод выражает в алгоритмической форме свойства объекта, передаваемые моделью. Средства реализуют методы принятия решений с помощью интеллектуальных компьютерных программ.

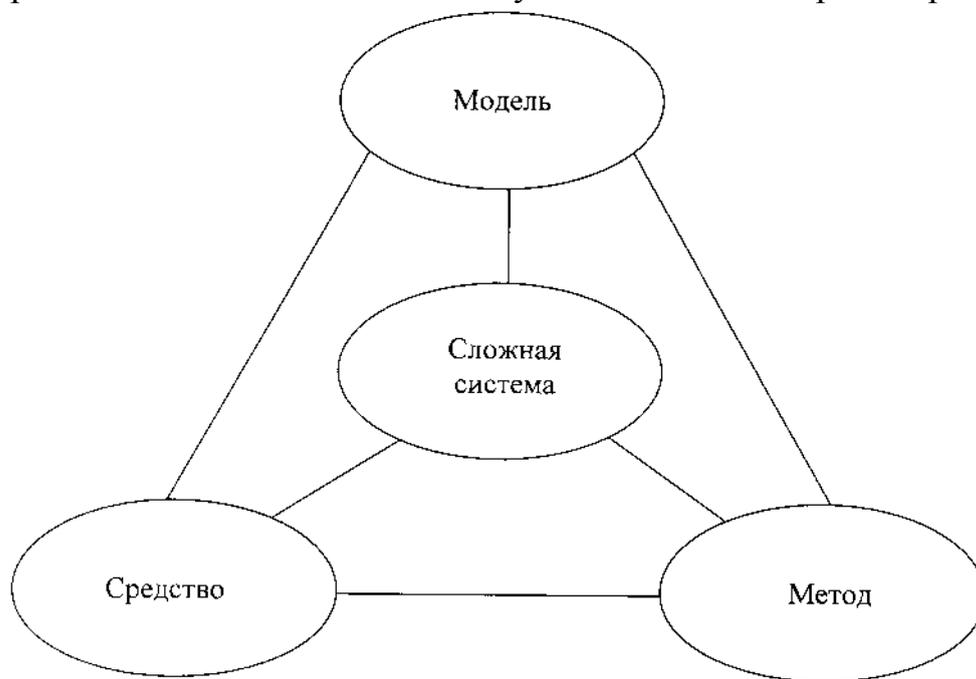


Рис. 1.5. Структура поддержки принятия решений при управлении сложной системой

Чем более развит системный интеллект, тем более гибок процесс возможного функционирования при имеющихся ограничениях. Свобода действий в естественной замкнутой системе характеризуется увеличением ее энтропии, однако, в искусственной системе это, наоборот, поддержание низкой энтропии системы, т.е. более высокой степени организованности системы, переход от наблюдения внешних проявлений к исследованию и устранению внутренних первопричин неустойчивых и аварийных состояний.

## 1.8. Понятие модели и моделирования. Классификация моделей

Научные знания можно разделить на две категории: фундаментальные и прикладные [3, 7, 17].

*Фундаментальные знания* описывают наиболее общие законы природы и техники.

*Прикладные знания* представляют собой разновидность фундаментальных знаний и находят применение при организации производства товаров и в сфере услуг. Какая-то часть этих товаров и услуг используется в процессе исследований, что, в свою очередь, повышает уровень фундаментальных и прикладных знаний.

Для согласования результатов «смежных» исследовательских программ и выработки единого убедительного для практики заключения – хорошим средством оказывается модель.

*Модель* – материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе изучения замещает объект-оригинал, сохраняя некоторые важные для данного исследования типичные его черты.

*Моделирование* можно рассматривать как замещение исследуемого объекта (оригинала) его условным образом, описанием или другим объектом, именуемым моделью и обеспечивающим адекватное с оригиналом поведение в рамках заданных допущений. Моделирование обычно выполняется с целью познания свойств оригинала путем исследования его модели, а не самого объекта. Моделирование оправдано в том случае, когда оно проще создания самого оригинала или когда последний по каким-то причинам лучше вообще не создавать. Реальная польза от моделирования может быть получена при условии, что модель адекватна оригиналу в том смысле, что должна с достаточной точностью отображать интересующие исследователя характеристики оригинала.

В большинстве случаев моделирование вовсе не заменяет реальный объект и не отменяет необходимости в его разработке и натурном испытании. Оно просто значительно уменьшает объем работ по проектированию и исследованию объектов. В тех же случаях, когда это не так, стоимость моделирования может оказаться вполне сравнимой со стоимостью разработок и натуральных испытаний изделий.

Дадим классификацию моделей, отражающую в первую очередь методологические вопросы процедуры построения математических моделей и нахождения их решения с помощью ЭВМ.

Если исходить из целевого направления информационных потоков, циркулирующих между объектами и окружающим миром, модели можно разделить на модели для исследования и модели для управления.

Модели для исследования являются формой организации и представления знаний, средством соединения новых знаний с имеющимися. При расхождении модели с реальностью это несоответствие ликвидируется путем изменения модели.

Модели для управления являются средством организации практических действий, способом представления эталонных действий или их результата, т.е. являются рабочим представлением целей. Модели для управления используются для того, чтобы при обнаружении расхождения между моделью и реальным

процессом направить усилия на изменение реальности так, чтобы приблизить ее к модели. Они носят нормативный характер, играют роль стандарта, под который подгоняются как сама деятельность, так и ее результат. Примерами моделей управления служат планы и программы, уставы организаций, законы, алгоритмы, рабочие чертежи и шаблоны, параметры отбора, технологические допуски, технические требования и т.д.

Основное различие между исследовательскими моделями и моделями для управления состоит в том, что модели для исследований отражают существующее, а модели для управления – не существующее, но желаемое и возможно осуществимое.

По форме представления модели делят на физические, символические и смешанные.

*Физические модели* подразделяются на модели подобия и аналоговые.

Модели подобия характеризуются некоторыми масштабными изменениями, выбираемыми в соответствии с критериями подобия (например, глобус – модель земного шара). Природа процесса и его физическая сущность одинаковы как для модели, так и для исследуемого оригинала.

*Аналоговые модели* основаны на известных аналогиях между протеканием процессов в механических, тепловых, электрических, пневматических, гидравлических и других динамических системах и предназначены для исследования статических и динамических свойств объекта.

*Символические модели* характеризуются тем, что параметры реального объекта и отношения между ними представлены символами:

- семантическими (словами);
- математическими;
- логическими.

Класс символических моделей весьма широк. Наряду со словесными описаниями функционирования объектов – сценариями, сюда также относятся схематические модели: чертежи, графики и блок-схемы, логические блок-схемы (например, алгоритмы программ) и таблицы решений, таблицы и номограммы, а также математические описания – математические модели.

*Математическая модель* представляет собой набор формальных соотношений, которые отображают поведение исследуемой системы и состоящее из совокупности связанных между собой математическими зависимостями (формулами, уравнениями, неравенствами, логическими условиями) величин – факторов. По своей роли эти факторы целесообразно подразделить на параметры и характеристики.

*Модели функционирования* включают широкий спектр символических моделей, например:

- модель жизненного цикла системы, описывающая процессы существования системы от зарождения до прекращения функционирования;
- модели операций, выполняемых объектом, представляют описание взаимосвязанной совокупности процессов функционирования отдельных элементов объекта. Так, в состав моделей операций могут входить модели надежности,

характеризующие выход элементов системы из строя под влиянием эксплуатационных факторов;

- информационные модели, отображающие во взаимосвязи источники и потребители информации, виды информации, характер ее преобразования, а также их временные и количественные характеристики;

- процедурные модели, описывающие порядок взаимодействия элементов исследуемого объекта при выполнении различных операций, например обработки материалов, деятельности персонала, использования информации, в том числе и реализации процедур принятия управленческих решений;

- временные модели, описывающие процедуру функционирования объекта во времени и распределение ресурса «время» по отдельным компонентам объекта.

Параметрами объекта называются *факторы*, характеризующие свойства объекта или составляющих его элементов (рис. 1.6). В процессе исследования объекта ряд параметров может изменяться, поэтому они называются переменными, которые в свою очередь подразделяются на переменные состояния и переменные управления.

*Переменные состояния объекта* являются функцией переменных управления и воздействий внешней среды.

*Характеристиками* (выходными характеристиками) называются интересующие исследователя непосредственные конечные результаты функционирования объекта (естественно, что выходные характеристики являются переменными состояниями).

*Характеристики внешней среды* описывают свойства внешней среды, которые сказываются на процессе и результата функционирования объекта. Значения ряда факторов, определяющие начальное состояние объекта или внешней среды, называются начальными условиями.

При описании математической модели оперируют следующими понятиями:

- критерий оптимальности;
- целевая функция;
- система ограничений;
- уравнение связи;
- решение модели.

*Критерием оптимальности* называется некоторый показатель, служащий формализацией конкретной цели управления и выражаемый при помощи целевой функции через факторы модели. Критерий оптимальности определяет смысловое содержание целевой функции. В ряде случаев в качестве критерия оптимальности может выступать одна из выходных характеристик объекта.

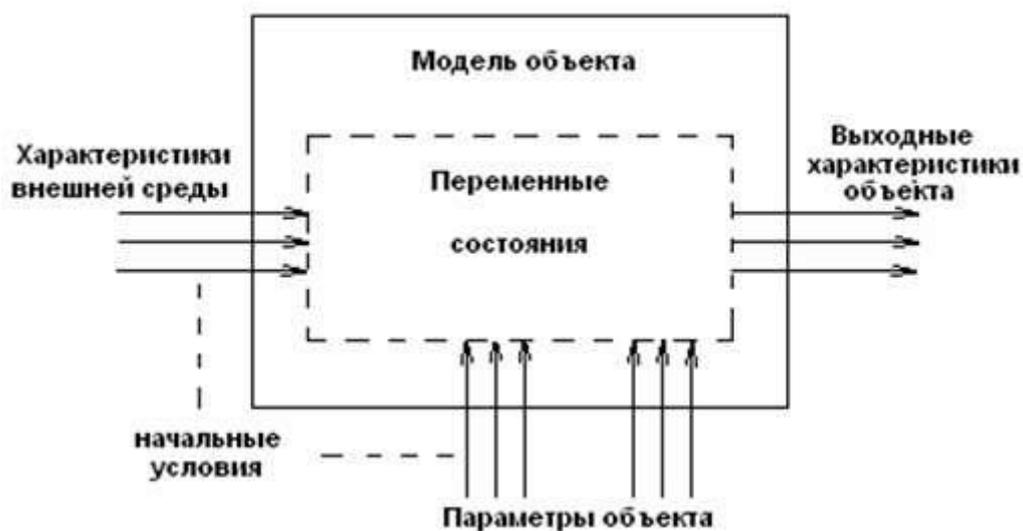


Рис.1.6. Классификация факторов по их роли в модели.

*Целевая функция* математически связывает между собой факторы модели, и ее значение определяется значениями этих величин. Содержательный смысл целевой функции придает только критерию оптимальности.

*Система ограничения* определяет пределы, сужающие область осуществимых, приемлемых или допустимых решений и фиксирующие внешние и внутренние свойства объекта. Ограничения определяют область протекания процесса, пределы изменения параметров и характеристик объекта.

*Уравнения связи* являются математической формализацией системы ограничений.

Критерии оптимальности и система ограничений определяют концепцию построения будущей математической модели, т.е. концептуальную модель, а их формализация, т.е. целевая функция и уравнения связи, представляет собой математическую модель.

*Решением математической модели* называется такой набор (совокупность) значений переменных, который удовлетворяет ее уравнениям связи.

*Модели, имеющие много решений*, называются вариантными в отличие от безвариантных, имеющих одно решение. Среди допустимых решений вариантной модели, как правило, находится одно решение, при котором целевая функция, в зависимости от смысла модели, имеет наибольшее или наименьшее значение. Такое решение, как и соответствующее значение целевой функции, называется *оптимальным*.

В зависимости от степени формализации связей между факторами различают аналитические и алгоритмические модели.

*Аналитической* называется модель в виде уравнений или неравенств, не имеющих разветвлений вычислительного процесса при определении значений любых переменных состояния модели, целевой функции и уравнений связи.

Если в математических моделях единственная целевая функция и ограничения заданы аналитически, то подобные модели относятся к классу моделей *математического программирования*.

Характер функциональных зависимостей может быть линейным и нелинейным. Соответственно этому математические модели делятся на линейные и нелинейные.

В сложной системе зачастую гораздо легче построить ее модель в виде алгоритма, показывающего отношения между элементами системы в процессе ее функционирования, задаваемые обычно в виде логических условий – разветвлений хода процесса.

К *алгоритмическим* моделям относятся и имитационные модели – моделирующие алгоритмы, имитирующие поведение элементов изучаемого объекта и взаимодействие между ними в процессе функционирования.

При *имитационном моделировании* процесс функционирования подсистем, выраженный в виде правил и уравнений, связывающих переменные, имитируется на компьютере. Для имитации используются специальные среды имитационного моделирования, позволяющие строить модели, имитирующие работу моделируемой системы, с любой степенью достоверности без проведения подробных аналитических преобразований.

В зависимости от того, содержит ли математическая модель случайные факторы, она может быть отнесена к классу стохастических или детерминированных.

В *детерминированных* моделях ни целевая функция, ни уравнения связи не содержат случайных факторов. Следовательно, для данного множества входных значений модели на выходе может быть получен только один единственный результат. Главная особенность детерминированной модели заключается в том, что любой прогноз получается в виде числа, а не в виде распределения вероятностей. Это в ряде случаев приемлемо, однако когда приходится иметь дело с величинами, значение которых предсказать трудно (количество осадков, ветровая нагрузка), такой подход оказывается совершенно неудовлетворительным.

*Стохастические математические* модели имеют факторы с вероятностной природой и характеризуются какими-либо законами распределения. Значения выходных характеристик в таких моделях могут быть предсказаны только в вероятностном смысле. Это даёт возможность оценивать не только среднее значение прогнозируемого параметра, но и его дисперсию.

Следующим признаком, по которому можно различать математические модели, является связь с фактором времени.

*Статическая модель* – это математическая функция, в которую не включена переменная времени. Все особенности поведения системы, имеющие выраженную зависимость от времени, при этом игнорируют. А поскольку все в мире быстро ли, медленно ли, но меняется, то любая статическая модель условна.

*Статическими* моделями пользуются, когда в рамках поставленной задачи инерционностью и «памятью» реальной системы можно пренебречь. Это возможно при выполнении ряда условий, в число которых входят следующие:

- система устойчива, т.е. переходные процессы после скачкообразного изменения входов затухают;

- входы меняются медленно;

- выходы изменяются редко.

*Динамические модели* позволяют учесть наличие «памяти», инерционности системы. Математическим аппаратом описания динамических систем являются дифференциальные, разностные уравнения, конечные автоматы, случайные процессы. Динамические модели, имеющие практическую ценность, обычно строятся на основе дифференциальных уравнений, не поддающихся прямому интегрированию, и решение их нельзя получить в виде простых аналитических выражений. В этом случае прибегают к численным методам решений на компьютере с помощью специального программного обеспечения.

Система может быть дискретной или непрерывной по входам, выходам и по времени. Под дискретным понимается конечное или счетное множество – один, два, три и т.д. Под непрерывным множеством понимается отрезок, луч или прямая линия, т.е. связное числовое множество, количество элементов которого стремится к бесконечности. Как правило, дискретность входа влечет за собой дискретность выхода объекта. Кроме того, для статических систем исчезает разница между непрерывным и дискретным временем.

*Смешанные модели* могут содержать как физические, так и символические элементы.

*Эмпирические модели* описывают связи между параметрами элементов одного уровня. Разработчик эмпирической модели всегда остается в пределах одного единственного уровня организационной иерархии, где он и строит уравнения, связывающие между собой параметры, свойственные подсистеме только данного уровня.

*Функциональная модель* объясняет связи между элементами как одного уровня иерархии, так и между различными уровнями. Разработчик функциональной модели стремится описать поведение системы с фундаментальных позиций, затрагивающих основу работы объекта, учитывающих наиболее общие закономерности его работы.

Всегда можно построить такую эмпирическую модель, которая была бы согласована с массивом опытных данных лучше, чем функциональная, т.к. эмпирическая модель практически свободна от ограничений, в то время как возможности функциональной модели ограничиваются положенными в ее основу допущениями, идеями и гипотезами.

**Получение данных и обработка данных для моделирования.** Исследование реального объекта и его математической модели связано с использованием исходной информации, получаемой в процессе непосредственного измерения на объекте. Получение данных осуществляют путем:

- 1) всеобщего контроля;
- 2) выборочного исследования;
- 3) планирования эксперимента.

При всеобщем контроле осуществляют измерения со всех объектов, по всем параметрам на всех временных интервалах. Это предполагает большие материальные и временные затраты на осуществление исследования.

*Выборочное исследование* – это метод исследования, при котором параметры изучаемого явления, происходящего на объекте, устанавливаются по определенной части этого объекта на основе положений случайного отбора выборки. Результаты исследования части объекта распространяются на весь объект – генеральную совокупность. В ряде исследований этот метод является единственно возможным, например, при контроле качества продукции, проводимом путем уничтожения или разложения на составляющие изучаемого продукта.

Особенность выборочного исследования состоит в том, что выбор единиц для обследования происходит по принципу равных возможностей попадания в выборку каждой единицы исследуемого параметра- считается, что клейковина в массе зерна постоянна для всего элеватора- генеральной совокупности (для одной партии или потока). При распространении результатов выборки на всю генеральную совокупность возникают ошибки, зависящие от разных факторов: степени вариации изучаемого явления, численности выборки, методов отбора единиц для исследования, принятого уровня достоверности результатов. Для снижения ошибки применяют случайные (рандомизированные) выборки.

*Рандомизация* – это случайный выбор объекта исследования, его уровня или варианта.

Исходные экспериментальные данные с объекта, например для двух величин  $x$  и  $y$ , формируются в виде таблиц измерений зависимой (выходной) величины  $y$  от независимой (входной) величины  $x$ .

Исходные данные об объекте или его модели могут быть представлены в виде:

- 1) отдельных чисел;
- 2) векторов и матриц чисел;
- 3) временного (динамического) ряда.

*Экспертные оценки* применяются, когда нет надлежащей теоретической или экспериментальной информации об объекте исследования. Исходя из полученной в результате анализа модели объекта исходной информации, определяются направления, специальности, по которым необходимо привлечь экспертов. В оценке эксперта будут интегрированы его знания, интуиция и опыт, относящиеся к конкретному явлению.

Например, один из методов экспертной оценки – метод Дельфи, состоит в последовательном анкетировании мнений экспертов различных направлений деятельности по интересующим вопросам, основанных на логическом анализе, интуиции и опыте. Метод предполагает использование серии анкет, в каждой из которых содержится информация и мнения, полученные из предыдущих анкет. Степень достоверности экспертизы устанавливается по погрешности, с которой оценка эксперта в итоге подтверждается последующими событиями.

*Свертывание векторов* (скаляризация). В случаях, когда выходная информация представлена в виде вектора, для упрощения анализа применяют его свертывание.

Линейная свертка применяется в случае необходимости иметь один выходной параметр или в случае разных по своей физической природе частных параметров  $u$ , с разными шкалами и размерностями.

*Планирование эксперимента* – это метод исследования, при котором параметры изучаемого явления устанавливаются с помощью специальных планов.

## 1.9. Задачи оптимизации и основные понятия

В практической деятельности управления в сложной системе специалисты часто сталкиваются с ситуацией, когда им из некоторой совокупности возможных вариантов своего поведения или принятия решения необходимо выбрать один вариант [1, 3, 7, 17]. Наилучший вариант поведения, принятие наилучшего решения можно выбирать по-разному. Если такой выбор предусматривает проведение количественного анализа ситуации путем сравнения различных вариантов с помощью какой-либо количественной оценки этих вариантов, то говорят о необходимости решения задачи оптимизации (лат. *optimus* – наилучший).

При этом задача оптимизации имеет смысл, если есть несколько возможных вариантов ее решения. Эти варианты обычно называют альтернативами.

По содержанию задачи оптимизации весьма разнообразны. Они могут быть связаны с проектированием технических устройств и технологических процессов, с распределением ограниченных ресурсов и планированием работы предприятий, наконец, с решением проблем, возникающих в повседневной жизни человека. Всевозможные устройства, процессы и ситуации, применительно к которым предстоит решать задачу оптимизации, объединяются общим названием объекта оптимизации.

**Основные понятия.** Для решения задачи оптимизации нужно, прежде всего, найти ответы на следующие вопросы:

- 1) что значит «лучше»?
- 2) что конкретно нужно улучшить?
- 3) за счет чего можно добиться улучшения, что можно изменить?
- 4) в каких пределах можно производить изменения?

Отвечая на первый вопрос, необходимо сформулировать критерий оптимальности, т.е. определить те признаки и предпочтения, по которым следует провести сравнительную оценку альтернатив и выбрать среди них наилучшую с точки зрения поставленной цели оптимизации. Именно с этой точки зрения можно ответить на второй вопрос: что конкретно нужно улучшить? Это может быть повышение производительности оборудования или срока службы технического устройства, снижение массы конструкции аппарата или затрат на его производство и т.п.

Для ответа на два последних вопроса необходимо располагать математической моделью объекта оптимизации. Эта модель описывает объект при помощи соотношений между величинами, характеризующими его свойства. Обычно хотя бы часть этих величин можно изменять в некоторых пределах, что и порождает множество альтернатив, среди которых и предстоит выбрать наилучшую. Изменяемые при оптимизации величины, входящие в математическую модель объекта оптимизации, называют параметрами оптимизации, а соотношения, устанавливающие пределы возможного изменения этих параметров, – ограничениями. Эти ограничения могут быть заданы в форме равенств или неравенств. Их называют соответственно ограничениями типа равенства или ограничениями типа неравенства.

Если множество параметров оптимизации является подмножеством конечномерного линейного пространства, то говорят о конечномерной задаче оптимизации в отличие от бесконечномерных задач, которые рассматривают в вариационном исчислении и оптимальном управлении. При этом критерием оптимальности может быть требование достижения наибольшего или наименьшего значения одной или несколькими действительными (скалярными) функциями параметров оптимизации, выражающими количественно меру достижения цели оптимизации рассматриваемого объекта. Каждую из таких функций принято называть целевой.

Если целевая функция единственная, то задачу конечномерной оптимизации называют задачей математического программирования, а в противном случае – задачей многокритериальной (векторной) оптимизации.

Если целевая функция и ограничения являются линейными относительно параметров оптимизации, то говорят о задаче линейного программирования. Одну из первых таких задач сформулировал и решил Л.В. Канторович – отечественный математик и экономист, лауреат Нобелевской премии 1975 г. Задача Канторовича была связана с выбором оптимальной производственной программы, что и объясняет появление в названии этого класса задач слова «программирование».

При нелинейной зависимости целевой функции или ограничений от параметров оптимизации говорят о задаче нелинейного программирования.

Теория оптимизации находит эффективное применение во всех направлениях инженерной деятельности, и в первую очередь в случаях четырех ее областях:

- 1) проектирование систем и их составных частей;
- 2) планирование и анализ функционирования существующих систем;
- 3) инженерный анализ и обработка информации;
- 4) управление динамическими системами.

Теория оптимизации представляет собой совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценивания возможных вариантов.

**Этапы постановки задачи.** Для того, чтобы использовать математические результаты и численные методы теории оптимизации для решения конкретных инженерных задач, необходимо:

1) установить границы подлежащей оптимизации инженерной системы. Система представляется как некоторая изолированная часть реального мира. Границы системы задаются пределами, отделяющими систему от высшей среды, и служат для выделения системы из ее окружения. При проведении анализа обычно предполагается, что взаимосвязи между системой и внешней средой зафиксированы на некотором выбранном уровне представления;

2) определить количественный критерий, на основе которого можно произвести анализ вариантов, с целью выявления «наилучшего». Под критерием оптимальности подразумевается мера, которая дает возможность выбрать наилучший вариант из имеющейся совокупности. В одних приложениях выбираются критерии экономического характера; в других - критерии, которые основываются на некоторых технологических факторах и т.п. Независимо от того, какой критерий выбирается при оптимизации, «наилучшему» варианту всегда соответствует минимальное или максимальное значение характеристического критерия;

3) осуществить выбор внутрисистемных переменных, которые используются для определения характеристик идентификации вариантов. Это переменные, которые должны адекватно описывать допустимые проекты или условия функционирования системы. При выборе независимых переменных целесообразно руководствоваться правилом, согласно которому следует рассматривать только те переменные, которые оказывают существенное влияние на характеристический критерий, выбранный для анализа сложной системы;

4) построить модель системы. Модель описывает взаимосвязи между переменными задачи и отражает влияние независимых переменных на степень достижения цели, определяемой характеристическим критерием. Структура модели может включать основные уравнения материальных и энергетических балансов, соотношения, связанные с проектными решениями, уравнения, описывающие физические процессы, протекающие в системе. Эти уравнения обычно дополняются неравенствами, которые определяют область допустимых значений независимых переменных, позволяют определить требования, накладываемые на верхние или нижние границы изменения характеристик функционирования системы, и установить лимиты имеющихся ресурсов.

Таким образом, задача в виде, пригодном для применения оптимизационных методов, объединяет:

- 1) характеристическую меру;
- 2) множество независимых переменных;
- 3) модель, отражающую взаимосвязь переменных.

**Структура оптимизационных задач.** Оптимальные задачи можно классифицировать как задачи минимизации вещественнозначной функции  $f(x)$   $N$ -мерного векторного аргумента  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , компоненты которого удовле-

творяют системе уравнений  $h_k(x) = 0$ ; набору неравенств  $g_j(x) \geq 0$ , а также ограничены сверху и снизу, т.е.  $x_i(u) \geq x_i \geq x_i(l)$ .

Функция  $f(x)$  называется целевой функцией, уравнения  $h_u(x) = 0$  – ограничениями типа равенств, неравенства  $g_j(x) \geq 0$  – ограничениями типа неравенств. При этом предполагается, что все функции являются вещественнозначными, а число ограничений – конечно.

**Классификация оптимизационных задач.** Задачи оптимизации можно классифицировать в соответствии с видами функций  $f(x)$ ,  $h_k$ ,  $g_i$  и размерностью вектора  $X$ .

Задачи без ограничений, в которых  $X$  представляет собой одномерный вектор, называются задачами с одной переменной и составляют простейший, но весьма важный подкласс оптимизационных задач.

Задачи условной оптимизации, в которых функция  $h_x$  и  $g_j$  являются линейными, называются задачами с линейными ограничениями. В таких задачах функция  $f(x)$  может быть линейной и нелинейной.

Задачи, в которых целевая функция  $f(x)$  – линейная функция вектора непрерывных переменных, называются задачами линейного программирования.

Задачи, в которых целевая функция  $f(x)$  – линейная функция целочисленных переменных, называются задачами целочисленного линейного программирования.

Задачи с нелинейной целевой функцией  $f(x)$  и линейными ограничениями  $h_u$ ,  $g_j$  называются задачами нелинейного программирования с линейными ограничениями. Оптимизация задачи такого рода можно классифицировать на основе структурных особенностей нелинейных целевых функций.

Если  $f(x)$  – квадратичная функция, это задача квадратичного программирования.

Если  $f(x)$  – есть отношение линейных функций – это задача дробно-линейного программирования. Деление оптимальных задач на эти классы важно тем, что специфические особенности тех или иных задач играют важную роль при разработке методов их решения.

## 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОПТИМИЗАЦИИ

### 2.1. Характеристика задач оптимизации

В области вычислительной математики сложилось самостоятельное направление по численным методам оптимизации, ориентированное на исследование новых классов задач, разработку методов и построение единого аппарата для анализа сходимости численных процедур. В настоящее время разработано множество численных методов для всех основных теоретически обоснованных классов задач: безусловной минимизации гладких и негладких функций в различных пространствах; условной статической и динамической оптимизации при ограничениях различного типа.

Для большинства методов имеется строгое доказательство, выявлена скорость сходимости и обоснована область применения.

Однако такие проблемы как построение эффективных методов для некоторых специальных типов задач, выбор оптимальных методов с учетом специфики проблемы, создание доступных и работоспособных программ для ЭВМ пока ещё не решены.

Оптимизация технологических процессов долгое время не являлась задачей первостепенной важности. Возможности для практического применения методов в течение длительного времени не существовало в связи с отсутствием и низкой адекватностью математических моделей, недостаточной прикладной пригодностью известных методов оптимизации и низкой вычислительной мощностью ЭВМ.

Вопрос о целесообразности расходования средств на внедрение методов оптимизации оставался спорным. Первыми областями применения современных методов оптимизации принято считать авиацию и космос, где раньше, чем где-либо было признано, что применение методов позволит достичь лучших и более совершенных технических результатов. Большую роль при этом сыграли точные знания о процессах, подлежащих оптимизации, которые обеспечивали получение реальных результатов в короткие сроки, что в свою очередь способствовало проведению систематических исследований и развитию уже известных методов с целью их более широкого практического применения.

Становится очевидным, что решение практических задач требует неформальных действий разработчика, возможности участия в диалоговом режиме в процессе поиска и необходимости проведения предварительных вычислительных экспериментов с целью получения начального приближения.

В наиболее общем смысле теория оптимизации представляет собой совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценивания возможных вариантов. Процесс оптимизации лежит в основе всей инженерной деятельности, поскольку классические функции инженера заключаются в повышении качества функционирования существующих и в проектировании

новых более эффективных и менее дорогостоящих технических систем и, с другой стороны, разрабатывать методы систем.

Эффективность оптимизационных методов, позволяющих осуществить выбор наилучшего варианта, тесно связана с широким использованием достижений в области математики путем реализации на базе применения вычислительной техники интерактивных вычислительных схем, опирающихся на строго обоснованные логические процедуры и алгоритмы. Поэтому для понимания основ оптимизации требуется привлечение важнейших результатов теории матриц, элементов линейной алгебры и дифференциального исчисления, а также положений математического анализа. Математические понятия и конструкции используются не только для того, чтобы повысить уровень строгости представления материала, но и потому, что они составляют терминологическую базу изложения, которая позволяет упростить описание и определение структурных элементов рассматриваемых вычислительных процедур и облегчить их понимание.

Поскольку размерность инженерных задач, как правило, достаточно велика, а расчеты в соответствии с алгоритмами оптимизации требуют значительных затрат времени, оптимизационные методы ориентированы главным образом на реализацию с помощью ЭВМ.

Проблема оптимизации технологий процессов в настоящее время как никогда актуальна в связи с низкими технико-экономическими показателями существующих агрегатов, большими затратами материальных и энергетических ресурсов на производство единицы продукции. Необходимо создание новых экологически чистых, ресурсо- и энергосберегающих технологий. Много задач связано с реконструкцией и совершенствованием существующих технологий, рациональным использованием имеющихся ресурсов в рамках функционирования нового хозяйственного механизма. Отмеченное предполагает формулировку и решение различных по сложности задач оптимизации.

## 2.2. Обозначения и терминология

Чтобы выделить определенные аспекты используемой в пособии терминологии, в этом разделе сделаны некоторые предварительные замечания относительно ряда терминов, довольно часто встречающихся в литературе по оптимизации.

**Оптимальное решение.** Вектор  $X^* = [x_1^*, \dots, x_n^*]^T$ , удовлетворяющий условию  $f(X^*) = \max(\min) f(X)$  называется оптимальной точкой, а соответствующее значение  $f(X^*)$  – оптимальным значением целевой функции. Здесь индекс  $T$  обозначает вектор-строку. Пара  $X^*$  и  $f(X^*)$  составляет оптимальное решение. Как показано на рис. 2.1, могут существовать различные типы оптимальных решений, если целевая функция не является унимодальной (т.е. имеющей один экстремум). Глобальное оптимальное решение представляет собой наименьшее значение  $f(X)^*$ , тогда как локальное или относительное оптимальное решение

представляет собой наименьшее значение  $f(X)$  в окрестности некоторого вектора  $X$ . Как для глобального, так и для локального минимума

$$f(X^*) \leq f(X)$$

но для глобального оптимального решения это соотношение выполняется для всех  $X \in E^n$  либо допустимой области, тогда как для локального оптимального решения это имеет место только для малой области  $\xi$ , где  $\|X - X^*\| < \xi$ . Если принимается во внимание и точность решения, то условие оптимальности можно представить в виде

$$f(X^*) \leq f(X) - \gamma,$$

где  $\gamma$  - некоторая малая величина.

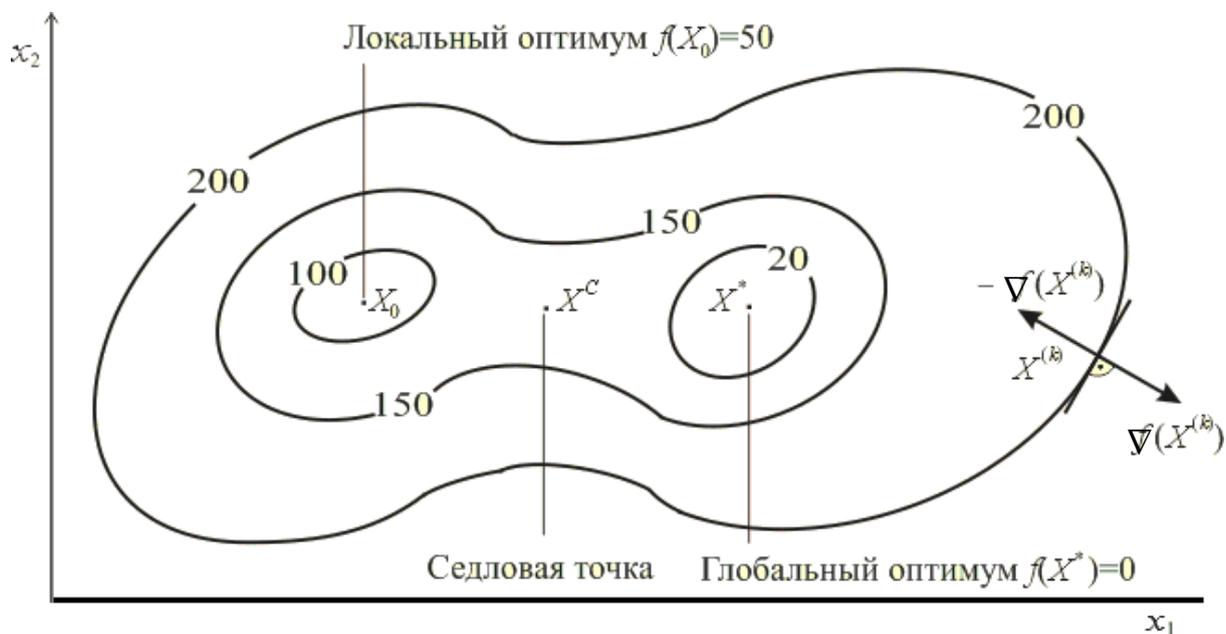


Рис. 2.1. Виды оптимальных решений

Существуют области, в которых целевая функция изменяется незначительно. Такие окрестности получили название седловых точек.

В основном все алгоритмы, описываемые в последующих главах, дают лишь локально оптимальные решения. На практике предположение о том, что локальный экстремум является глобальным, может быть проверено путем использования нескольких начальных векторов. Однако, если найдено только одно решение, ещё недостаточно полагать, что оно является обязательно для данной системы или процесса глобальным.

**Допустимость решений.** В практических задачах область изменения факторов всегда конечна. Это объясняется наличием конструктивных, техноло-

гических ограничений и определенным запасом ресурсов. Задачи, в которых  $X \in E^n$ , называют безусловной оптимизацией, а задачи с ограничениями – условной. Выделяют ограничения типа равенств  $h(X) = 0$  и неравенств  $g(X) \leq 0$ .

Любой вектор  $X$ , удовлетворяющий ограничениям в виде равенств и неравенств, называется допустимой точкой или допустимым вектором. Множество всех точек, удовлетворяющих ограничениям, образуют допустимую область  $R$  функции  $f(X)$ . Любая точка вне  $R$  называется недопустимой. Условный оптимум представляет собой локальный оптимум, лежащий на границе или внутри допустимой области. Если ограничения имеют вид равенств, то допустимый вектор  $X$  должен лежать на пересечении всех гиперповерхностей, соответствующих  $h_j(X) = 0$ . При ограничениях в виде неравенств точка  $X$  может быть либо внутренней точкой (допустимой точкой), либо граничной точкой (тоже допустимой точкой), либо внешней точкой (недопустимой точкой). Область допустимых значений переменных может быть односвязной и не односвязной. В последнем случае может оказаться, что алгоритм осуществит обследование одной из допустимых областей.

Методы решения задач безусловной оптимизации рассматриваются во второй главе, а условной в третьей.

**Поверхность отклика.** Область  $f(X)$ , в которой осуществляется нахождение оптимального решения, представляет некоторую поверхность в многомерном пространстве. Поверхность отклика наглядно можно представить для одномерного и двухмерного случаев. Для графического представления функций двух переменных используют линии уровня. Это множество точек, для которых целевая функция имеет постоянное значение. Изображение функции с помощью линий уровня показано на рис. 2.1. В топологии поверхности оптимума выделяют несколько характерных видов: круговой холм, эллиптический холм, симметричное или вытянутое седло, стационарный или спадающий овраг и др. Вопросы геометрической интерпретации поверхностей отклика подробно изложены в [1, 13].

**Точность определения экстремальных точек.** В настоящее время, в связи с применением ЭВМ, разработано большое множество численных методов нахождения оптимального решения. Любой численный метод предполагает реализацию последовательности многократно повторяющихся действий (итераций), которые должны привести к цели. С каждой итерацией мы должны приближаться к решению задачи. В этом случае говорят, что метод сходится. Всегда возникает вопрос: до каких пор следует выполнять итерации, тем более, что каждая из них может занимать довольно значительное время. Для ответа на этот вопрос вводят понятие точности определения экстремума. В каждом конкретном случае точность задается самим исследователем в зависимости от поставленной задачи и размерности величин.

Можно использовать следующие критерии оценки точности:

- заданная точность определения значения переменных;
- заданная точность определения значения функции в экстремальной точке;
- оценка значений составляющих вектора градиента или его нормы;

– комбинация перечисленных условий или их одновременное выполнение.

Первое условие имеет вид  $\left| X^{(k+1)} - X^{(k)} \right| \leq \varepsilon$ , где  $X^{(k+1)}$  и  $X^{(k)}$  – значения переменных на  $k+1$  и  $k$ -ой итерациях, а  $\varepsilon$  – некоторая константа, определяющая точность поиска. Это условие вполне универсально за исключением случаев с «острым» пиком поверхностей отклика.

Условие второго вида  $\left| f(X^{(k+1)}) - f(X^{(k)}) \right| \leq \varepsilon$  не пригодно для функций

с «пологим» экстремумом или «оврагом». В этом случае найденное решение может находиться довольно далеко от точки оптимума.

Критерий оценки точности определения оптимума третьего вида вытекает из необходимых условий существования экстремума ( $\nabla f(X^*) = 0$  и  $\|\nabla f(X^*)\| = 0$ ), поэтому проверяется одно из условий:  $\|\nabla f(X^{(k)})\| \leq \varepsilon$  или  $\|\nabla f(X^{(k)})\| \leq \varepsilon$ .

В ряде задач, когда переменные имеют различные диапазоны изменения, необходимо задавать набор  $\varepsilon$ . Так, например, если  $x_1$  – температура металла, а  $x_2$  – концентрация углерода в металле, то следует задать, например,  $\varepsilon_1 = 1$ , а  $\varepsilon_2 = 0,002$ .

Необходимые и достаточные условия существования решений для некоторых случаев рассматриваются ниже в соответствующих разделах.

### 2.3. Основные этапы решения задач оптимизации

Прежде чем использовать математические процедуры и численные методы теории оптимизации для решения конкретных инженерных задач, необходимо:

- обосновать критерий, на основе которого можно произвести количественный анализ вариантов с целью выявления «наилучшего»;
- установить границы подлежащей оптимизации системы или объекта;
- осуществить выбор внутрисистемных переменных и построить модель, отражающую взаимосвязи между переменными.

Эта последовательность действий составляет первую часть процесса решения задач оптимизации. Корректная постановка задачи служит ключом к успеху и ассоциируется в большей степени с искусством, нежели с точной наукой. Искусство постановки задач постигается в практической деятельности на примерах успешно реализованных разработок и должно быть взаимосвязано с четким представлением преимуществ, недостатков и специфических особенностей различных методов теории оптимизации.

Вторая часть этапов решения содержит:

- выбор способа оптимизации;
- формализацию задачи и выбор метода;
- реализацию задачи;
- анализ полученных результатов.

Кратко остановимся на характеристике некоторых этапов.

**Формулировка цели и обоснование критерия.** На первом этапе произ-

водится выбор критерия, на основе которого можно выявить «наилучший» или множество «наилучших» условий функционирования системы, являющихся целью решаемой задачи. Обычно используют критерии двух видов: экономического плана (капитальные вложения, энергетические и материальные затраты, себестоимость продукции, прибыль в единицу времени, отношение затрат к прибыли) и технологического характера (продолжительность технологических операций, надежность, скорость протекания процессов и др.).

Цель имеет, как правило, содержательный смысл, а критерий должен быть:

- количественно определяемым;
- иметь конечное значение в области изменения факторов;
- обладать чувствительностью к входящим в него переменным.

Формально критерием может быть функция линейного

$$f(X) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

или произвольного вида, а также функционал, характеризующий, например, суммарные затраты за некоторый промежуток времени

$$Q(U, \tau) = \int_0^{\tau} \varphi[U(\tau)] d\tau.$$

В первом случае имеет место задача статической оптимизации, а во втором – динамической или задача оптимального управления.

При решении практических задач обычно формулируется несколько критериев, чаще всего противоречивых. Такую ситуацию называют неопределенностью цели. Раздел, в котором решаются такие задачи, называют векторной оптимизацией. Для преодоления трудностей можно использовать следующие подходы [12]: линейную свертку; контрольные показатели; выделение главной цели; введение метрики в пространстве целевых функций; построение компромиссов Паретто и др.

В настоящем пособии рассматриваются методы решения задач статической скалярной оптимизации.

**Выделение объекта.** Этот этап необходим:

- для установления границ изучаемой системы с внешней средой;
- формирования вида допустимой области и характера ограничений.

Под системой понимается совокупность взаимодействующих элементов, действие которых направлено на достижение поставленной цели. Границы системы носят условный характер и задаются условиями, отделяющими систему от внешней среды.

В результате выполнения этого этапа определяют размерность задачи, границы изменения независимых переменных. Вид и характер ограничений зависит от диапазонов изменения переменных, их взаимосвязей и наличия запасов ресурсов на управление. Для установления и формализации взаимосвязей необходим этап математического описания объекта оптимизации.

**Выбор способа оптимизации.** Применяются два направления для ре-

шения задач оптимизации:

- прямая оптимизация на объекте;
- оптимизация на основе математической модели.

В задачах проектирования и создания новых технологий второй подход является основным. Каждое из отмеченных направлений требует решения комплекса вопросов и применения соответствующих методов, имеет свои преимущества и недостатки.

В задачах прямой оптимизации могут быть использованы поисковые методы и методы планирования эксперимента при поиске оптимальных условий [13–15]. Это направление имеет свои специфические особенности (учет влияния помех, нестационарности процессов и т.д.), которые не рассматриваются в данной работе.

Последующие этапы, которые будем рассматривать, относятся ко второму направлению.

**Формализация задачи.** Решается в два этапа. На первом этапе осуществляется построение математической модели объекта с учетом сформулированного критерия и границ изменения независимых переменных. Затем производится математическая запись задачи с выделением критерия и системы ограничений.

В задачах статической оптимизации математическая модель преобразуется и является составной частью системы ограничений. В задачах оптимизации управления модель присутствует в явном виде. Результат этого этапа является основанием для выбора метода оптимизации.

**Выбор метода.** Аналитическое решение задачи оптимизации может быть получено лишь в исключительных случаях, а графическое представление – при размерности не более двух переменных. Поэтому основным способом является численное решение на ЭВМ. Выбор численного метода определяется:

- видом критерия;
- наличием и характером ограничений;
- размерностью задачи.

Общая схема классификации методов скалярной оптимизации показана на рис. 2.2. В данной работе рассматриваются только методы статической оптимизации, более детальная классификация и сущность которых излагается в соответствующих разделах пособия.

При выборе метода необходимо учитывать скорость сходимости, объём вычислений на каждой итерации, устойчивость к разного рода помехам, сложность реализации и требуемый объём памяти ЭВМ. После выбора метода необходима разработка алгоритмов и программного обеспечения.

**Реализация задачи на ЭВМ.** Переход от метода на том уровне, который рассматривается в литературе, к алгоритму непростая задача. Необходимо выбрать схемы решения вспомогательных задач, обосновать параметры, определяющие точность решения и критерии прерывания счета и т.д. От этих мало-значущих на идейном уровне подробностей в очень большой мере зависит эффективность алгоритма. Похожие проблемы возникают при реализации на ЭВМ. Это выбор языка программирования, организация массивов данных, про-

цедур ввода и вывода информации.

Работоспособность алгоритма проверяется на нескольких характерных (типовых, контрольных) задачах, в процессе решения которых настраиваются параметры, заменяются некоторые процедуры, устанавливается требуемая точность решения и т.д. Удобным является диалоговый режим, который имеет для таких задач значительные преимущества.

**Анализ результатов.** Полученные результаты расчета на ЭВМ требуют глубокого анализа по точности, содержательной интерпретации и практической применимости. Точность найденного решения для некоторых задач можно оценить теоретически или экспериментально, осуществляя решение из различных начальных координат, а также с использованием различных критериев останова. Содержательный анализ и проверка соответствия результатов практическим условиям необходимы по той причине, что математическая модель всегда является отражением реальной действительности. Поэтому возможно получение противоречивых результатов. В таких случаях возникает необходимость корректировки модели и проведение повторного решения поставленной задачи.

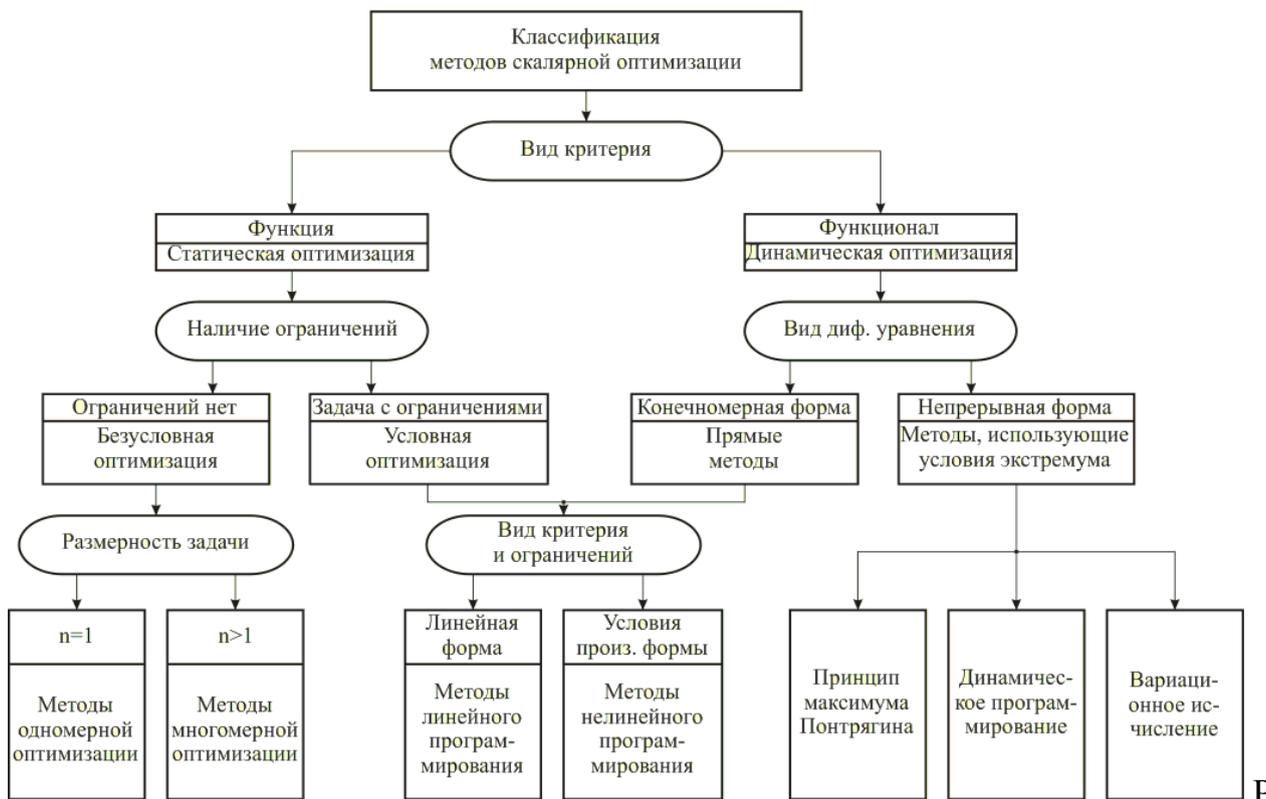


Рис. 2.2. Общая схема классификации методов скалярной оптимизации

## Список литературы

1. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации.– М.: Энергоатомиздат, 2001.
2. Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М. АСУ и оптимизация режимов энергосистем.– М.: Высшая школа, 1993.
3. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем.– М.: Наука, 1998.
4. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике.– М.: Изд-во МЭИ, 2004.
5. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985.
6. Гельман Г.А. Автоматизированные системы управления энергоснабжением промышленных предприятий.– М.: Энергоатомиздат, 1994.
7. Гордеев А.С. Моделирование в агроинженерии. – Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2007.
8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.– Минск: Изд-во стандартов.
9. ГОСТ 21027-75. Системы энергетические. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов.
10. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его приложение к принятию приближенных решений.– М.: Мир, 1996.
11. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств.– М.: Радио и связь, 2002.
12. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий.– М.: Интермет Инжиниринг, 2006.
13. Нариньяни А.И. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1986. № 5.
14. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова.– М.: Наука, 1996.
15. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений/ А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. – М.: Радио и связь, 1999.
16. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации.– М.: Наука, 1998.
17. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высш. шк., 1989.
18. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика.– М.: Наука, 2006.
19. Правила устройства электроустановок. – М.: НЦ ЭНАС, 2006.
20. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно.– М.: Мир, 2003.