

ПЕРЕДАНО В ДАР

Ольшанский В.И.



МОДЕЛИРОВАНИЕ, КАЧЕСТВО И СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Под редакцией академика Белорусской инженерной академии,
доктора технических наук, профессора В. А. Горохова

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РБ по образованию в области автоматизации технических процессов, производств и управления к изданию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Технологические машины и оборудование», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Технологические машины и оборудование», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Старый Оскол
ТНТ
2020

Библиотека ВГУ



УДК 621-044.58:004.94(075.8)

ББК 34.4

Г-703

М74

Авторы:

В. А. Горохов, Ю. Е. Махаринский,
Н. В. Беляков, В. И. Ольшанский

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор И. А. Каштальян
кандидат технических наук, доцент В. А. Фруцкий

Г 703 **Моделирование, качество и синтез моделей технических систем [Текст] : учебник / В. А. Горохов [и др.]; под ред. В. А. Горохова. — Старый Оскол : ТНТ, 2020. — 224 с. : ил.**

ISBN 978-5-94178-684-8

Издание посвящено методам и программным средствам моделирования технических систем (ТС). В нём даны понятия систем и основы моделирования технико-производственных задач по обеспечению экономически обоснованного выпуска готовых изделий машиностроения современного технического уровня, качества, в нужном количестве и высокой конкурентной способности. Техническая сторона чаще всего характеризуется моделированием и управлением ТС в виде конструкций изделий и технологических процессов (ТП), а производственная — моделированием и управлением производственных систем (ПС) в виде рабочих мест, линий, участков и цехов. Приведены сведения о жизненном цикле и эволюции ТС и ПС.

Подробно рассмотрены методы моделирования технико-производственных задач машиностроения, включая понятия и анализ систем, моделирование технических и производственных задач; критерии качества ТС от их эффективности до их экономичности и эргономичности; параметрический синтез ТС, включая синтез математических моделей, назначение и расчёт показателей компонентов ТС, методы оптимизации ТС.

Издание адресовано студентам машиностроительных направлений вузов и может использоваться инженерно-техническими и научными работниками предприятий и НИИ, также слушателями системы переподготовки и повышения квалификации кадров машиностроения и науки.

УДК 621

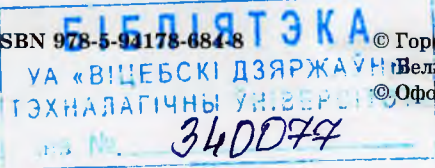
ББК 34.4

ISBN 978-5-94178-684-8

© Горохов В. А., Махаринский Ю. Е.,

Беляков Н. В., Ольшанский В. И., 2020

© Оформление. ООО «ТНТ», 2020



Оглавление

Основные условные обозначения	5
Введение	7
Глава 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИКО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ.....	12
1.1. Основные понятия и анализ систем	12
1.2. Моделирование технических систем (ТС)	34
1.2.1. Модель и информация	34
1.2.2. Виды моделирования технических систем.....	40
1.2.3. Виды моделей.....	44
1.2.4. Математические модели.....	60
1.2.5. Управление техническими системами.....	70
1.2.6. Жизненный цикл и эволюция технических систем	74
1.3. Особенности моделирования производственных систем (ПС).....	85
1.3.1. Общие положения, цели и задачи моделирования.....	85
1.3.2. Классификация производственных моделей	88
1.3.3. Свойства и требования к моделям, стадии и этапы их проектирования.....	91
1.3.4. Структура моделей (модель моделей)	95
1.3.5. Адекватность моделей	97
1.3.6. Общие рекомендации по разработке моделей	100
<i>Контрольные вопросы</i>	102
Глава 2. КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	104
2.1. Качество и эффективность технических систем	104
2.2. Критерии производительности и точности	111
2.3. Критерии универсальности и гибкости	114
2.4. Критерии надежности	116

2.5. Критерий сложности устройства.....	119
2.6. Экономические критерии	121
2.7. Эргономический критерий.....	126
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>127</i>

Глава 3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....128

3.1. Синтез математических моделей технических систем....	128
3.1.1. Общие положения	128
3.1.2. Синтез эмпирических моделей.....	130
3.2. Назначение и расчет показателей компонентов технических систем	172
3.3. Оптимизация	179
3.3.1. Общие понятия	179
3.3.2. Однофакторная однокритериальная оптимизация.....	183
3.3.3. Многофакторная однокритериальная оптимизация.....	191
3.3.4. Многокритериальные задачи принятия решений	197
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>203</i>

Приложение.....204

1. Статистические критерии.....	204
2. Графики моделей и спрямляющие подстановки.....	209

Библиографический список220

10	.....	220
20	.....	220
30	.....	220
40	.....	220
50	.....	220
60	.....	220
70	.....	220
80	.....	220
90	.....	220
100	.....	220
110	.....	220
120	.....	220
130	.....	220
140	.....	220
150	.....	220
160	.....	220
170	.....	220
180	.....	220
190	.....	220
200	.....	220

340047

Основные условные обозначения

- АРИЗ** — алгоритм решения изобретательских задач
АРк — качественный показатель вида А
ВД — выходные данные
ВИД — варьируемые (управляемые) исходные данные
ВРк — качественный показатель вида В
ВФ — вспомогательная функция
ВрФ — вредная функция
ГМЗ — геометрическая модель заготовки
ГПФ — главная полезная функция
ДФ — дополнительная функция
ИД — исходные данные
ИР — изменение размеров
ИРС — изменение размеров и свойств
ИРФ — изменение размеров и формы
ИС — изменение свойств
ИТР — идеальное техническое решение
ИУ — измерительное устройство
Иэ — индекс эффективности затрат
Кг — коэффициент готовности
КПМ — комплексный метод поиска технических решений
КТС — компоненты технической системы
МП — матрица планирования
МТТР — массив типовых технических решений
НФ — ненужная функция
НЭ — нежелательный эффект
ОУ — объект управления
ОФ — основная функция
ОЭМ — обобщенный эвристический метод
ПС — производственная система
ПФ — показатели функционирования

- ПЭ** — положительный эффект (показатели эффективности)
ПМП — параметрический метод разрешения противоречий
ППД — поверхностное пластическое деформирование
ПФ — полезная функция
Rk — количественный показатель качества
Ru — узловой показатель
ПФЭ — полный факторный эксперимент
СЛУ — счетно-логическое устройство
ТС — техническая система
ТП — технологический процесс
ТПр — техническое противоречие
УВ — управляющее воздействие
УУ — управляющая подсистема
ФЗ — функциональные зависимости
ФИД — фиксируемые (заданные, неуправляемые) исходные данные
ФП — факторный план
ФПД — физический принцип действия
ФСА — функционально-стоимостной анализ
ФПр — физическое противоречие

Введение

Издание посвящено методам и средствам моделирования технико-производственных систем. На протяжении всей истории человечества определяющим фактором его развития были процессы создания и совершенствования различных технических систем (изделий и технологий) и их реализацией для удовлетворения разнообразных индивидуальных и общественных потребностей. Тысячи известных и безымянных изобретателей и рационализаторов (ученых, инженеров, техников, рабочих) породили в настоящий момент необъятный мир технических (ТС) и производственных (ПС) систем.

В условиях, когда преобразующая сила общественного производства по своим масштабам стала сравнимой с природными процессами, все острее ощущается необходимость в сознательном контроле и управлении формированием новой технической среды жизни человека — «второй природы», вносящей существенные изменения во взаимоотношения человека с естественной природой. В этих условиях технология машиностроения из науки второго порядка, обслуживающей творчество по совершенствованию машин и приборов, встала в один ряд с конструированием. Теперь технологию машиностроения можно трактовать как науку по материализации конструкторских идей, которая не только гарантирует заложенное качество и эффективность производства изделий, но и обеспечивает технологическими путями улучшение их эксплуатационных свойств, сокращение времени изготовления и повышение ресурса работы в усложнённых условиях эксплуатации (космос, тропическая жара и влажность, океанские глубины и т. д.).

Задача современного инженерного корпуса — это не просто создание технических устройств, механизмов, машин, техпроцессов, производственных участков, цехов, концернов и т. п. В его функции входит также обеспечение их нормального функционирования (не только в техническом смысле), удобство обслуживания, бережное отношение к окружающей среде, наконец, благоприятное эстетическое воздействие на человека и т. п.

Если инженер-конструктор не предусмотрел того, что наряду с экономическими, техническими и эксплуатационными требованиями должны быть соблюдены также и требования безопасного, бесшумного, удобного и экологичного применения инженерных устройств, то из средства служения людям техника может стать враждебной человеку и даже подвергнуть опасности само его существование на земле.

Процесс создания, например, любой технической системы состоит из основных стадий: моделирование, прогнозирование качества, проектирования, изготовления, испытания и применения. По мере усложнения техники именно стадии моделирования, прогнозирования качества, синтез моделей и проектирования в основном стали определять длительность цикла и уровень затрат на создание системы, а также ее качество. Последнее особенно важно, так как качество технических систем закладывается ещё при моделировании, а при проектировании и изготовлении изделий его требуется сохранить и даже улучшить.

Для того, чтобы добиться успеха при решении инженерных задач, инженеры механик и конструктор, которые будут заниматься проектированием, наряду со знаниями и умениями, полученными в процессе обучения, должны: компетентно и уверенно разбираться в основных идеях научных дисциплин, лежащих за пределами данной узкой специальности; уметь выдумывать полезные идеи или принципы, лежащие в основе вещей или процессов, предназначенных для достижения поставленных целей; уметь принимать решения в условиях неопределенности и др.

Необходимость повышения производительности инженерного труда привела к его значительной дифференциации. Сейчас нет просто инженеров, а есть инженеры-моделировщики, инженеры-конструкторы, инженеры-технологи, инженеры-дизайнеры и т. д. Вместе с тем, все более явственны новые тенденции к интеграции, связанные с изменением технологии инженерного труда и с изменением понимания процессов моделирования и проектирования.

Но в настоящее время учебный процесс подготовки инженеров в основном построен на упражнениях в решении таких теоретических и практических задач, для которых имеется готовая постановка, даются алгоритмы решения, имеются примеры решения по каждому алгоритму, а преподавателю известен ответ. Поэтому многие выпускники вузов теряются в условиях, когда требуется самостоятельно поставить задачу проектирования, найти нетрадиционное конструкторско-технологическое решение.

Основными целями учебных дисциплин «Моделирование, качество и синтез моделей», «Теория проектирования и совершенствования технических систем» и других подобных курсов являются:

- формирование основ профессионального мировоззрения специалиста с системным инженерным мышлением, главной функцией которого будет моделирование с синтезом моделей, проектирование и совершенствование изделий, технологического оборудования, оснастки или технологических процессов изготовления машин;
- обучение навыкам постановки и решения нетиповых (поисковых) задач моделирования и проектирования;
- выявление и раскрытие творческих наклонностей и способностей, о которых будущий инженер может и не подозревать;
- повышение творческого потенциала специалиста.

После каждого раздела предлагаются вопросы для самоконтроля уровня освоения материала. Это способствует поз-

тапному подконтрольному изучению, что очень важно для эффективности самостоятельной работы студентов, а также для заочной и дистанционной форм подготовки кадров машиностроения и приборостроения.

В последние десятилетия вышел в свет ряд книг, посвященных методике моделирования и проектирования, однако учебно-методических пособий, отвечающих потребностям обучения инженеров творческому подходу к проектированию, крайне мало. В предлагаемом издании с системных позиций обобщены работы в области общей методики моделирования и проектирования с учетом идей функционально-стоимостного анализа (ФСА) и теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) в машиностроении.

Книга состоит из трёх глав и двух приложений. *Первая глава* по моделированию технико-производственных задач посвящена анализу основных свойств технических и производственных задач машиностроения, методов их моделирования, управления и эволюции. *Во второй главе* по критериям качества технических систем рассматриваются вопросы качества и эффективности ТС и описываются критерии от производительности и точности до экономичности и эргономичности систем. *В третьей главе* по параметрическому синтезу ТС описываются синтез эмпирических моделей, назначение и расчет компонентов моделей ТС и оптимизация технических решений.

В соответствии с Образовательным стандартом ОСВО 1-37 01 07–2013 основной сферой деятельности инженера-моделировщика, -механика и -конструктора машиностроения являются моделирование, проектирование и производство ТС. Для успешного осуществления этой деятельности специалист-машиностроитель должен приобрести при изучении данного издания ряд академических и профессиональных компетенций.

К академическим компетенциям следует отнести: АК-1. Умение применять базовые научно-теоретические знания для

решения теоретических и практических задач; АК-9. Умение учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни. В отношении профессиональных компетенций специалист должен приобрести способности: ПК-1. Управление технологическими процессами изготовления деталей и обслуживания оборудования на уровне мастера, инженера технической службы, начальника отделения, участка и цеха; ПК-45. Контроль качества выполняемых работ, включая работы по изготовлению деталей, изделий и их контролю; ПК-69. Участие в организации работы по повышению квалификации среднего персонала и профессионального мастерства рабочих; ПК-73. Осуществление поиска, систематизации и анализа информации по передовому опыту, новым изделиям и методам обработки заготовок деталей, проектам и техническим решениям.

Книга адресуется в первую очередь студентам, которые к началу изучения этой дисциплины уже имеют общетехническую подготовку, достаточную, чтобы воспринимать основные положения теории моделирования и разбираться в приводимых примерах. Чтобы примеры решения задач моделирования были понятны и обозримы, они должны приходить к относительно несложным объектам из области техники, соответствующей профилю специальности студента. Но, тем не менее, методика моделирования технико-производственных систем, в общем, не зависит от объекта и может быть использована в различных областях техники, технологии и производства.

Глава 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИКО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

1.1. Основные понятия и анализ систем

В основе любой научной или учебной дисциплины лежит относительно небольшой набор четко определенных понятий. Система таких понятий должна позволить на одном языке судить о разных объектах техники и технологии и достаточно четко сопоставлять их свойства. При формировании основных понятий авторы руководствовались следующими принципами:

- каждое понятие должно иметь отношение ко всем известным техническим объектам и процессам;
- понятия должны отражать основные свойства технических систем, с которыми приходится иметь дело при их проектировании и изучении;
- вводимые понятия должны в наибольшей мере использовать и учитывать сложившуюся в технических науках терминологию.

Существует множество определений понятия «система». Самым общим и широким является следующее. *Система* — это объективное единство закономерно связанных друг с другом объектов, явлений, а также знаний о природе и обществе. В зависимости от поставленной задачи, в различных конкретных ситуациях можно (и нужно) пользоваться другими, более полными определениями, включающими такие понятия, как: компоненты, отношения, цель, связи, структура, а иногда и субъект, решающий задачу. «Рабочее» определение системы может уточняться, расширяться или сужаться в зависимости от хода решения задачи. Оно помогает исследователю (разработчику) начать описание системы.

В курсах ОТПС, МЗП и ТПТС рассматриваются основы моделирования технико-производственных задач машиностроения в ТС, и ПС, теория проектирования технических систем, включающих изделия и технологии, то есть искусственные материальные и абстрактные (идеальные) системы, создаваемые человеком для определенного (полезного) назначения. Поэтому в дальнейшем будут рассмотрены понятия и определения, касающиеся как ТС, так ПС.

Техническая система — целостная совокупность составляющих ее частей (подсистем, компонентов, элементов), между которыми имеются существенные устойчивые отношения, закономерно обуславливающие свойства системы как единого целого и позволяющие выделить её из окружающей среды. Система как целое обладает особым, системным свойством (свойствами), которых нет у ее компонентов при любом способе декомпозиции. Или более поздняя трактовка.

Техническая система — это материальный объект искусственного происхождения, который состоит из элементов (составных частей, различающихся свойствами, проявляющимися во взаимодействии), объединенных связями (линиями передачи единиц или потоков чего-либо) и вступивших в определённые отношения (условия и способы реализации свойств элементов) между собой и с внешней средой, чтобы осуществить процесс (последовательность действий для изменения или поддержания состояния) и выполнить функцию ТСТ — цель, назначение, роль. ТС имеет структуру (устройство, взаиморасположение элементов и связей, задающее устойчивость и восприимчивость функции ТС). Каждая составная часть ТС имеет индивидуальное функциональное назначение (цели использования) в системе.

В отношении функционального состава и свойств объектов ТС можно отметить, что в каждой ТС существует функциональная часть — объект управления (ОУ). Функции ОУ в ТС заключаются в восприятии управляющих воздействий (УВ) и в изменении в соответствии с ними своего состояния. ОУ в ТС не выполняет функций принятия решений, то есть

не формирует и не выбирает альтернативы, а только реагирует на внешние (управляющие и возмущающие) воздействия, изменяя свои состояния predeterminedным его конструкцией образом. В ОУ всегда могут быть выделены две функциональные части — сенсорная и исполнительная.

Сенсорная часть образуется совокупностью устройств, непосредственной причиной изменения состояния каждого из которых являются соответствующие ему и предназначенные для этого управляющие воздействия. Примерами сенсорных устройств являются выключатели, переключатели, задвижки, заслонки, датчики и другие подобные им по функциональному назначению устройства управления техническими системами.

Исполнительная часть образована совокупностью материальных объектов, все или отдельные комбинации состояний которых рассматриваются в качестве целевых состояний ТС, в которых она способна самостоятельно выполнять предусмотренные её конструкцией потребительские функции. Непосредственной причиной изменения состояний исполнительной части ТС являются изменения состояний её сенсорной части.

Классификационные признаки объектов:

- представляют собой целостную совокупность конечного множества взаимодействующих материальных объектов;
- имеют условия штатной эксплуатации, предусмотренные их конструкцией;
- содержат последовательно взаимодействующие друг с другом сенсорные и исполнительные части;
- имеют модели управляемого predeterminedного причинно-следственного поведения в пространстве достижимых равновесных устойчивых состояний;
- имеют целевые состояния, соответствующие состояниям исполнительной части ОУ в ТС;
- имеют способность, находясь в целевых состояниях, самостоятельно выполнять потребительские функции.

Таким образом, **ТС** — это целостная совокупность конечного числа взаимосвязанных материальных объектов, имеющая последовательно взаимодействующие сенсорную и исполнительную функциональные части, модель их предопределённого поведения в пространстве равномерных устойчивых состояний и способность, при нахождении хотя бы в одном из них (целевом состоянии), самостоятельно выполнять в штатных условиях предусмотренные ее конструкцией потребительские функции.

Техническая подсистема — это часть системы, имеющая все признаки объектов таксона (группы дискретных объектов, связанных определенной общностью) технические системы. Подсистема может быть частью некоторой системы, которая сама может не относиться к классу ТС.

Устройство — это целостная совокупность конечного числа взаимосвязанных материальных объектов, имеющая модель предопределенного поведения и равновесные устойчивые состояния в штатных условиях эксплуатации. Оно состоит из неразделимых на элементы материальных и функциональных объектов — деталей.

Указанным понятиям соответствуют, с одной стороны, различные приспособления, механизмы, приборы, машины и сооружения, а с другой — процессы преобразования материала, энергии и/или информации (сигналов), обработки, которые осуществляются при их эксплуатации. Эти преобразования и обработка производятся с помощью технической системы в четко определенной последовательности и удовлетворяет определенную потребность.

Таким образом, можно все технические системы условно разделить на два класса: устройства или **технические объекты** (ТО) и **технологические** (технические) **процессы** (ТП).

Элементом системы называется её часть, которая является пределом ее членения на части с точки зрения конкретной решаемой задачи. Термин «**подсистема**» подчеркивает, что такая часть рассматриваемой системы должна обладать всеми

указанными выше признаками системы. **Компонент** — термин, объединяющий понятия подсистема и элемент.

ТС и любая другая система обладает рядом диалектически взаимоисключающих признаков:

- **целостность** и **делимость**;
- **изолируемость** и **коммуникативность**;
- **наблюдаемость** и **неопределенность**;
- **отображаемость** и **нетождественность**.

Целостность обозначает, что совокупность взаимосвязанных частей, рассматриваемых в качестве системы, какова бы ни была их природа, представляет собой некоторое единство, обладающее общими (системными) свойствами и поведением, которые не свойственны ее составляющим. **Делимость** обозначает, что целостный объект всегда рассматривается как состоящий из частей (компонентов).

Изолируемость обозначает, что комплекс взаимосвязанных компонентов, образующих систему, можно ограничить от его окружения и рассматривать изолированно. **Коммуникативность** обозначает, что система не изолирована от других систем, а связана множеством коммуникаций со средой (окружением), из которой она выделена. Эти коммуникации называются входами, если через них среда оказывает воздействие на систему, и выходами, если через их посредство система оказывает воздействие на среду.

Наблюдаемость обозначает, что все без исключения свойства системы могут быть либо контролируемы, либо, в крайнем случае, наблюдаемы. **Неопределенность** обозначает, что невозможно одновременно фиксировать все свойства системы.

Отображаемость обозначает, что система любой сложности может быть отображена конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань ее сущности и может быть использована для решения определенной задачи. **Неотождественность** отображения обозначает, что отображение свойств системы при помощи моделей является приближенным, относительным.

Кроме того, все системы обладают еще одним признаком — *иерархичностью*, которая означает, что компонент системы также является системой, но более низкого уровня, а рассматриваемая система, в свою очередь, является компонентом более широкой системы.

Студент должен сделать попытку приложить определение понятия «техническая система» и взаимоисключающие признаки системы к известному ему из курса «Детали машин» устройству (например, редуктору или муфте) и к известному ему из курса «Технология конструкционных материалов» технологическому процессу (например, получения отливки или поковки).

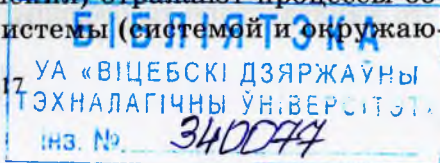
Окружающая среда — реально существующее (ближайшее) окружение (другие системы), которое имеет с рассматриваемой системой определенные отношения. Свойства системы проявляются через ее отношения с *окружающей средой*, которая характеризуется как нечто целое, нерасчлененное на части.

Отношения — отражают характер упорядочения, расположения и взаимозависимости компонентов системы. Компоненты системы, вступая в определенные отношения, утрачивают часть своих свойств, которыми они потенциально обладали в «свободном» состоянии.

Основными видами отношений являются: *пространственные, временные, логические, причинные и иерархические*.

Пространственные отношения характеризуют взаимное расположение компонентов системы в пространстве (расстояния, относительные повороты), то есть компоновку системы. **Временные отношения** описывают упорядочение событий (поведения компонентов системы) во времени. **Логические отношения** (типа *ЕСЛИ-ТО, И-ИЛИ* и т. д.) определяют поведение компонентов системы в зависимости от изменений в окружающей среде или внутри системы.

Связи (причинные отношения) отражают процессы обмена между компонентами системы (системой и окружаю-



щей средой), веществом, энергией и (или) информацией. Связи, через которые воздействие окружающей среды передается системе, называются **входами**. А связи, через которые система воздействует (материально, энергетически и/или информационно) на окружающую среду, называются **выходами**. Выход одного из компонентов системы является одновременно входом какого-либо другого компонента.

Иерархические отношения — характеризуют принадлежность компонента B системе A , соподчиненность, опосредованность связей компонентов системы.

Свойства любой технической системы можно разбить на две независимые группы. Первую из них образуют свойства, которые определяют «границу» системы, отделяющую ее от других систем. Главное, что отличает одну техническую систему от другой, это то, какую потребность она позволяет удовлетворять. Свойства, различимые по этому признаку, в технике принято называть **функциями**. Все остальные свойства технических систем относятся ко второй группе и называются (оцениваются) **показателями**.

Функция системы — это её свойство, определяемое через **действие** (D), которое в фиксированных **условиях** ($У$) данная система оказывает на «внешний» по отношению к ней объект (систему). Действие системы описывается следующими словами: сохранение, изменение, накопление, измерение и т. д. Условия реализации действия определяются через совокупность отношений системы и окружающей среды, в том числе и **объектом** (O), на который направлено действие. Для полного описания функции (Φ) необходимо указывать **начальное** (H) и **конечное** (P) **состояния** объекта воздействия. Понятие «внешний» по отношению к объекту, на который направлено действие, является относительным. Можно, а в некоторых случаях и нужно, считать такой объект временным компонентом системы. Функцию системы можно отразить следующим символьным выражением:

$$\Phi = \langle D \rightarrow O; H \rightarrow P; У \rangle.$$

Примеры описания функций технической системы приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Примеры описания функций технической системы

Техническая система	Компоненты описания		
	Д	О	У
Ключ	Открывает	замок	при его повороте
Ленточный транспортер	Транспортирует между двумя точками в пространстве	сыпучие грузы	при угле наклона не более 20 градусов
Шариковый подшипник	Снижает момент сопротивления вращению	вала вокруг своей оси	если он собран с валом и корпусом
Процесс закалки	Повышает твердость	детали	если она нагревается до определенной температуры и быстро охлаждается

Можно еще сказать, что функция ТС описывает ее способность преобразовывать входные объекты (материальной, энергетической и (или) информационной природы) в требуемые выходные объекты путем упорядоченного использования природных явлений и законов.

Функционированием системы будем называть процесс преобразования ресурсов в результат, соответствующий ее назначению.

Определение функции применимо и к компонентам системы. Для реализации функции системы необходимо функционирование всех ее компонентов. При этом результат функционирования одних компонентов системы обеспечивает необходимые условия для функционирования других ее компонентов. Следовательно, функция системы представляет собой упорядоченное множество компонентов (подфункций), между которыми обязательно существуют определенные от-

ношения. Кроме того, каждая техническая функция характеризуется определенной степенью сложности. Самую нижнюю ступень в иерархии сложности занимают элементарные функции. Сложную функцию (систему) можно разделить на компоненты, между которыми имеются определенные отношения. Поэтому *функция системы в свою очередь может рассматриваться как система.*

Функции технических систем (и их компонентов) можно разделить на следующие группы:

- *по области проявления* — общесистемные (внешние) и внутрисистемные (внутренние);
- *по роли в удовлетворении потребностей*: среди внешних — главные (эксплуатационные), дополнительные и второстепенные, а среди внутренних — основные (рабочие) и вспомогательные;
- *по степени необходимости* — необходимые (полезные) и излишние (бесполезные и вредные);
- *по характеру проявления* — номинальные (требуемые), действительные (реализуемые) и потенциальные (проявляются при изменении условий функционирования технической системы).

Внешняя функция выполняется системой в условиях взаимодействия с внешней средой, а **внутренняя функция** отражает действия и взаимосвязи внутри системы, принцип ее построения и особенности исполнения.

Техническая система создается для выполнения **главной полезной** (внешней) **функции** (ГПФ).

Основная функция (ОФ) — внутренняя функция, которая обеспечивает принцип работы технической системы, создает условия, необходимые для осуществления внешних функций. Она непосредственно не связана с назначением технической системы и является в большинстве случаев результатом тех конструкторских, технологических или организационных решений, которые используются для реализации ГПФ. Без строго заданной, установленной совокупности (набора) основных функций не может быть осуществлена главная полезная функция. По содержанию различают основные функ-

ции: *приема* (ввода), *передачи*, *преобразования*, *хранения* (вещества, энергии, информации), *выдачи* (отдачи) результатов.

Так, например, ГПФ токарного станка «осуществлять формообразование поверхностей вращения» нельзя будет реализовать без некоторого набора основных функций. Например, таких как: «вращать заготовку», «перемещать инструмент (резец)», «связывать скорости вращения и подачи резца», «изменять частоту вращения заготовки», «потреблять электроэнергию» и т. д.

Вспомогательная функция (ВФ) — внутренняя функция, которая способствует выполнению нескольких основных либо обусловлена этими функциями, их взаимодействием между собой. Различают: *соединительные*, *изолирующие* (прокладки), *фиксирующие* (шпильки), *направляющие*, *гарантирующие* (предохранители) и другие ВФ. Вспомогательные функции приспособляют средства реализации ГПФ или ОФ к реальным условиям функционирования, делают их более удобными для пользователя, повышают эффективность проявления ГПФ и ОФ.

Дополнительная функция (ДФ) направлена не на объект ГПФ, а на какие-то компоненты надсистемы либо на саму техническую систему в целом (ориентация и закрепление станочных приспособлений на столе станка).

Ненужная (излишняя) функция (НФ) не оказывает влияния на ГПФ или ОФ. Такие функции чаще всего появляются в результате ошибок проектирования (т. е. такого видоизменения технической системы, при котором оставлены функции, не нужные в новых условиях потребления). **Вредные функции (ВрФ)** вызывают нежелательные эффекты в технической системе или в окружающей среде (нагрев, выделение вредных веществ).

Любая сформулированная функция соответствует некоторому классу технических систем, реализующих и (или) могущих ее реализовать. С другой стороны, одна и та же техническая система может выполнять различные функции. Наиболее распространенными функциональными компонентами технических систем являются:

Исходные (исполнительные) **компоненты** — непосредственно взаимодействующие с объектом, на который направлено действие. Их функция совпадает с функцией системы. Эти компоненты расположены на «границе» системы.

Несущие компоненты — обеспечивают определенную форму технической системы, определенное взаимное расположение и / или движение других ее компонентов в пространстве.

Компоненты связи — обеспечивают определенную степень свободы движения одних компонентов системы по отношению к другим. Число степеней свободы может изменяться от 0 до 6 и быть переменным во времени.

Компоненты передачи — обеспечивают передачу на расстояние движения (энергии) с одновременным преобразованием скорости, моментов и сил, а также законов движения.

Компоненты управления — обеспечивают сбор, хранение и обработку информации для выработки информации об управляющем воздействии и передачу соответствующего сигнала исполнительным органам (двигателям, рулям, регуляторам и т. д.).

Движители — преобразуют работу двигателя или другого источника энергии в работу по преодолению сопротивления движению технической системы или другого объекта (транспортные средства, насосы, вибропитатели, толкатели и т. д.).

Компоненты формирования объемов и потоков — обеспечивают хранение и (или) перемещение необходимых по величине и форме объемов жидких или сыпучих веществ.

Например, на рисунке 1.1 показана сборочная единица, главной полезной функцией которой является передача и изменение направления (на 90°) движения и крутящего момента от вала-шестерни 9 к зубчатому колесу 21. Эти детали являются исходными компонентами данного устройства. Корпус 1 является несущим компонентом этой системы. А подшипники (11, 18), распорные втулки (2, 3, 20), резьбовое кольцо (6), гайка (8) и винт (23) являются компонентами связи. Компонентами передачи этой системы являются конические вал-шестерня 9 и зубчатое колесо 15.

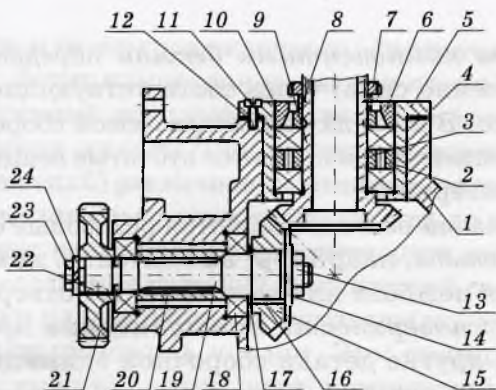


Рис. 1.1. Сборочная единица (редуктор):

- 1 — корпус; 2, 3, 10, 20 — втулка; 4 — прокладка; 5 — обойма;
 6 — кольцо; 7 — шайба стопорная; 8 — гайка; 9 — вал-шестерня;
 11, 18 — подшипник (2 шт); 12, 23 — винт (6 шт); 13 — гайка
 14 — шайба пружинная; 15, 21 — колесо зубчатое; 16, 22 — шпонка;
 17 — прокладка; 19 — вал; 24 — шайба пружинная

Отдельная деталь устройства также является технической системой. Компонентами таких систем являются отдельные поверхности или группы поверхностей, выполняющие хотя бы одну функцию. По выполняемым функциям компоненты детали делятся на: 1) *основные сборочные базы*, 2) *вспомогательные сборочные базы*, 3) *рабочие поверхности*, 4) *крепежные поверхности*, 5) *поверхности коммуникации* (для организации потоков, объемов и зазоров), 6) *объединяющие поверхности*, 7) *технологические поверхности*.

Основные сборочные базы выполняют функцию ориентации детали в сборочной единице. Так шейки вала 19 (рис. 1.1), которые опираются на подшипники 18, являются основными сборочными базами.

Вспомогательные сборочные базы выполняют функцию ориентации деталей, которые присоединяются к рассматриваемой. Так шейки вала 19 (совместно со шпоночными пазами, имеющимися на них), на которые монтируются зубчатое колесо 15 и шестерня 21 совместно со шпонками, являются вспомогательными сборочными базами.

Рабочими компонентами детали передается движение (и соответственно сила) через соответствующие компоненты другой детали. В деталях рассматриваемой сборочной единице рабочими компонентами являются зубчатые венцы шестерен *21*, *15* и вала-шестерни *9*.

Крепежными обычно являются резьбовые отверстия или наружные резьбы, например, на винтах. К ним относят также отверстия под болт или винт (рис. 1.1 отверстия под винты *12*). Через *поверхность коммуникации* проходят, не соприкасаясь, другие детали сборочной единицы. Например, через отверстие корпуса *1* проходит, не соприкасаясь, втулка *20*. Поверхности коммуникации (отверстия и канавки) служат также для подвода смазки, охлаждения и т. д.

Функцией *объединяющих поверхностей* является объединение детали в единое целое. *Технологические поверхности* (фаски и канавки) служат для облегчения относительной ориентации или сопряжения соединяемых деталей при сборке или для выхода инструмента при отделочной обработке.

В технической системе иногда трудно выделить функциональные компоненты. *Нередко один компонент выполняет несколько функций*. В таких случаях можно в зависимости от обстоятельств присваивать ему все его функции или одну, важнейшую.

На выполнение (реализацию) функции обычно требуются затраты ресурсов (времени, материала, энергии, информации и финансов). Минимальный их уровень называют функционально необходимым. Затраты, необходимые на создание носителя функции, называют производственными затратами на функцию. Затраты на использование (эксплуатацию) носителя функции называют эксплуатационными затратами на функцию.

Показатели можно разбить на два класса: *количественные* и *качественные*. К первому относят те показатели, которые имеют определенную интенсивность (количественную характеристику) и могут изменяться лишь в сторону увеличения или уменьшения этой интенсивности. Например: *масса, габарит, КПД, мощность, производительность, стоимость* и т. д. Количественные показатели описываются следующими видами величин: *размерными* или *безразмерными*,

абсолютными или относительными, дискретными или непрерывными, детерминированными или случайными.

Количественный показатель является положительным, если его значение желательно (исходя из надсистемных, очевидных соображений) **увеличивать**, и отрицательным — если его значение желательно **уменьшать** (вплоть до нуля). Многие количественные показатели характеризуют интенсивность и качество выполнения функций технической системы.

Ко второму классу относят показатели, которые невозможно охарактеризовать числом. Это: принцип действия, тип привода, тип компоновки, цвет, химический состав и т. д. Однако качественные показатели различных систем часто бывает возможно расположить в некотором порядке, так, чтобы их множество напоминало градацию одного свойства.

Показатели можно также классифицировать и по другим признакам:

- а) по значимости для выполнения функции (важные, неважные и несущественные, а также ненужные, вредные);
- б) по связи с другими показателями (независимые и зависимые);
- в) по физической природе (геометрические, механические, тепловые, оптические и т. д.);
- г) по воздействию на человека (удобство обслуживания, физическая и психологическая утомляемость, эстетическое воздействие);
- д) по качеству функционирования (надежность, безопасность и т. д.).

Совокупность значений показателей системы в определенный момент времени называется **состоянием** системы. Например, состояние поверхности детали описывается значениями следующих показателей: размеров и допусков на них, показателя шероховатости, например параметр *Ra*, и твердости.

Поведение системы описывается множеством последовательных во времени состояний. Эти изменения состояний могут быть вызваны намеренно (например, при обработке объекта производства) или самопроизвольно (например, под действием релаксации внутренних остаточных напряжений).

Совокупность устойчивых отношений между компонентами системы образует ее *структуру*. А совокупность компонентов системы и устойчивых отношений между ними характеризует *конфигурацию* системы. Например, для описания структуры системы, показанной на рисунке 1.1, достаточно дать характеристику связей между ее компонентами, при этом каждый компонент обозначается только соответствующим номером. А для описания ее конфигурации необходимо, кроме связей, приводить характеристики каждого компонента.

Процесс преобразования ТП представляет собой совокупность упорядоченных *технологических операций* — компонентов системы преобразования. Различают *рабочие* и *вспомогательные технологические операции*. К рабочим относятся операции: 1) формообразования (изменения формы и размеров); 2) изменения физико-механических свойств (твердости) материала; 3) сборки (образования соединений, регулировки, балансировки, совместной притирки); 4) отделки (удаления заусенцев, нанесения покрытий, полирования, окраски, маркировки); 5) упаковки.

Вспомогательные операции обеспечивают условия для выполнения рабочих операций. Например, прежде чем обрабатывать заготовку на станке, ее нужно соответствующим образом сориентировать относительно системы координат станка и закрепить так, чтобы эта ориентация не изменялась под действием сил резания.

С другой стороны, технологические операции подразделяются на три вида: 1) *внутрицикловые* рабочие 2) *внутрицикловые* вспомогательные; 3) *внецикловые* вспомогательные. Внутрицикловые технологические операции осуществляются во время функционирования технической системы.

Внутрицикловые вспомогательные операции могут быть *информационными* и *неинформационными*. В первом случае обеспечивается условное или безусловное управление работой технической системы. А во втором — изменяется положение объектов обработки в пространстве и во времени и (или) взаимное расположение рабочих органов.

Внецикловые вспомогательные операции осуществляют техническое обслуживание технической системы, поддерживают или восстанавливают ее работоспособное состояние.

Технологический (технический) процесс как система всегда имеет побочные (нежелательные) входы (помехи) и выходы (отходы). Их необходимо учитывать и анализировать. Например, нежелательными входами при механической обработке являются непредсказуемое изменение (в пределах допуска) размеров и твердости заготовки, а также затупление инструмента. А отходами при механической обработке являются стружка и отработанная охлаждающая жидкость. Эти отходы необходимо как-то транспортировать и утилизировать.

Временная структура технической системы (технологической машины или операции) характеризует ее, с одной стороны, количественно, указывая сколько (один или несколько) одинаковых компонентов содержит система, а с другой стороны, характеризует способ совмещения функций и компонентов системы во времени и пространстве.

Рассмотрим понятие *временная структура технической системы* на примере *технологической операции механической обработки*, которая состоит из *элементарных, инструментальных и вспомогательных* переходов, выполняемых на одном рабочем месте с помощью определенного оборудования и оснастки.

Элементарным переходом будем называть законченный процесс образования одной типовой поверхности детали при ее формировании одним инструментом с конкретными режимами резания. **Инструментальным** переходом называется законченный процесс образования нескольких типовых поверхностей детали одним инструментом с конкретными режимами резания. **Блочным** называют переход, при котором выполняется законченный процесс образования нескольких поверхностей с помощью всех инструментов, закрепленных в блоке (суппорте, многошпиндельной головке и т. д.).

Вспомогательным переходом называют часть процесса, связанного со вспомогательными движениями рабочего и (или)

механизмов станка, которые циклично повторяются и необходимы для выполнения процесса обработки детали на станке.

Количество рабочих позиций станка, инструментов и заготовок в каждой рабочей позиции, характер совмещения переходов и заготовок в рабочей позиции, характер совмещения вспомогательных и инструментальных переходов, способ получения размера и смены инструмента определяют **временную структуру операции**. Классификация структур операций по указанным признакам осуществляется следующим образом. По количеству рабочих позиций Π на станке операции делятся на: **однопозиционные** (Π_1) и **многопозиционные** (Π_n). В зависимости от количества инструментов I (переходов) в каждой рабочей позиции различают: **одноинструментальные** (I_1) и **многоинструментальные** (I_m) операции. В зависимости от количества заготовок D , обрабатываемых в каждой позиции, различают: **однодетальные** (D_1) и **многодетальные** (D_k) операции.

По способу совмещения переходов и заготовок в рабочих позициях различают: **несовмещенные** (0) операции, операции с **последовательным** (1) или **параллельным** (2) совмещением переходов и (или) заготовок, а также операции с **последовательно-параллельным** совмещением (3). Обычно обработка в разных рабочих позициях станка проводится одновременно (параллельно), но бывают станки, где обработка в разных рабочих позициях проводится последовательно, то есть пока идет обработка в одной из позиций, инструменты в других простаивают. Способ совмещения кодируется соответствующим символом (0, 1, 2 или 3), который записывается как показатель степени над символами качественных признаков (Π , I и D).

По характеру совмещения вспомогательных и инструментальных переходов различают: **однозонные периодические** (Z_1^n), **двухзонные периодические** (Z_2^n) и **двухзонные непрерывные** (Z_2^u) операции. В первом случае на станке рабочая зона совпадает пространственно с зоной загрузки заготовки. Следовательно, совмещение во времени вспомогательных и инструментальных переходов невозможно. В двухзонных операциях зона загрузки выделена пространственно и поэтому вспомогательные переходы могут полностью или частично совмещаться во времени с инструментальными.

В периодических операциях после выполнения рабочих движений инструмент и (или) заготовка возвращаются в исходное положение. То есть, выполняется вспомогательный переход, не совмещенный с инструментальным. А в непрерывных операциях вектор подачи заготовки в рабочую зону совпадает с вектором рабочей подачи, обработка ведется «на проход», поэтому нет необходимости в выполнении вспомогательного перехода возврата в исходное положение.

Операции, выполняемые на универсальных станках (токарных, сверлильных, фрезерных, шлифовальных), обычно являются однопозиционными и однозонными периодическими. Если обработка одной заготовки ведется одним инструментом, то код временной структуры такой операции имеет вид $\Pi_1^0 I_1^0 D_1^0 Z_1^n$.

На рисунках 1.2–1.5 показаны некоторые примеры структур операций. В операции, показанной на рисунке 1.2, отверстие обрабатывается последовательно разными инструментами. Поэтому код временной структуры такой операции имеет вид $\Pi_1^0 I_m^1 D_1^0 Z_1^n$.

Обработка вала (рис. 1.3) ведется двумя блоками резцов, один из которых осуществляет продольное, а другой — поперечное точение. Оба блока работают одновременно. Поэтому код временной структуры такой операции имеет вид $\Pi_1^0 I_m^2 D_1^0 Z_1^n$. В операциях, показанных на рисунке 1.4а, б, в рабочую зону последовательно и непрерывно подаются фрезеруемые заготовки. Загрузка заготовок и выгрузка обработанных деталей осуществляется вне рабочей зоны. Поэтому код временной структуры такой операции

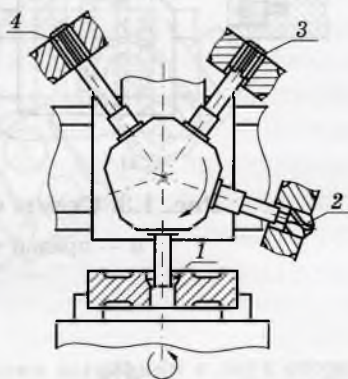


Рис. 1.2. Схема обработки отверстия заготовки зубчатого колеса на токарно-карусельном станке:

- 1 — зенкерование черновое;
- 2 — зенкерование чистовое;
- 3 — развертывание черновое;
- 4 — развертывание чистовое

имеет вид $\Pi_1^0 \text{И}_1^0 D_k^1 \text{З}_2^u$. Вполне определённо можно определить структуру операции, показанную на рисунке 1.5.

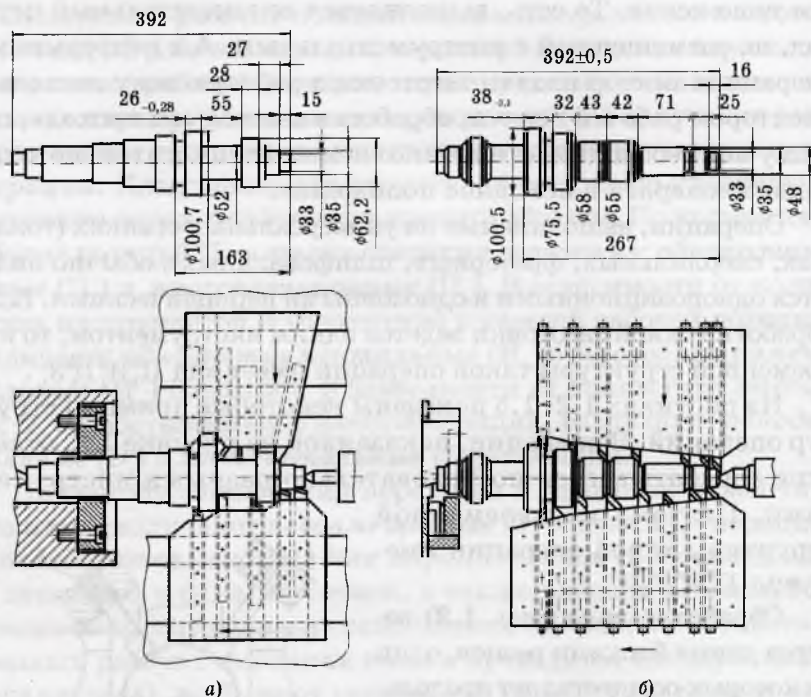


Рис. 1.3. Схемы операций обработки вала:

a — правой части; *б* — левой части

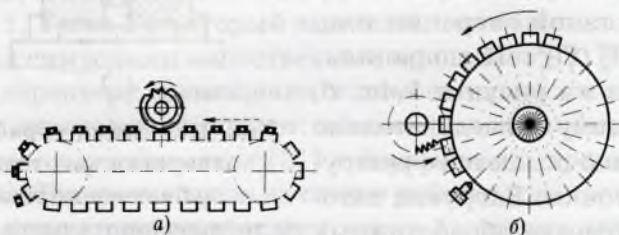


Рис. 1.4. Схемы операций обработки заготовок на фрезерных полуавтоматах:

a — с установкой заготовки на конвейерном приспособлении;
б — с установкой на барабанном приспособлении

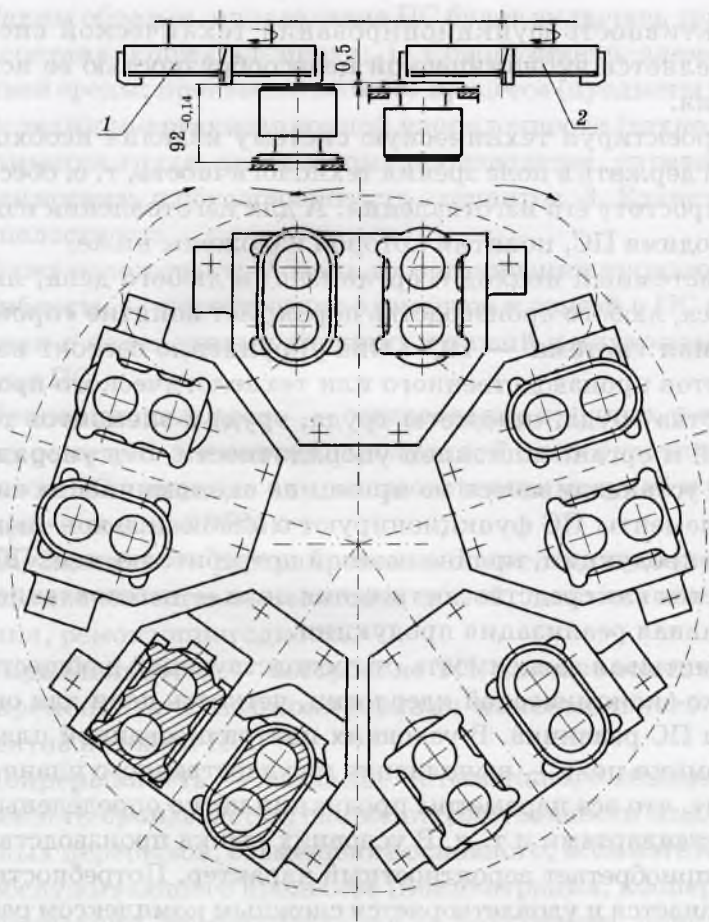


Рис. 1.5. Схема операции фрезерования заготовки с двух сторон на карусельном полуавтомате: фрезы черновой (1) и чистовой (2) обработки заготовок

Временная структура операции определяет структуру и уровень затрат времени на ее выполнение.

Любая техническая система должна иметь, по крайней мере, две шкалы оценок: экономической эффективности и качества выполнения возложенных на систему функций.

Эффективность функционирования технической системы определяется экономической целесообразностью ее использования.

Проектируя техническую систему изделия необходимо всегда держать в поле зрения технологичность, т. е. обеспечивать простоту его изготовления. А для изготовления изделия необходима ПС, понятия которой изложены ниже.

Системный подход к организации любого дела, любого бизнеса, любого производства порождает понятие «**производственная система — ПС**». Она укрупненно состоит из компонентов производственного или технологического процесса (средства труда, предметы труда, труд) и элементов технической и организационной упорядочности. Эта упорядоченность устанавливается из принципа экономичности систем. Все элементы ПС функционируют с одной целью — изготовление продукции, крайне важной потребителю, т. е. ПС формируется как средство достижения цели — изготовление и эффективная реализация продукции.

Учитывая зависимость от господствующей в обществе политико-экономической идеологии, чёткость цели для определения ПС различна. В условиях централизованной плановой экономики цель — выполнение государственного плана, а это значит, что все параметры продукции чётко определены заказом, стандартами и т. п. В условиях рынка производственная цель приобретает вероятностный характер. Потребность рынка познается и удовлетворяется сложным комплексом работ по маркетингу, проектированию, логистике и т. п. (системой целей ПС).

Производственная система (с учетом человека) — это большая, сложная, кибернетическая, смешанная, вероятностная, динамическая система, охватывающая процессы разработки, производства, обмена, потребления и распределения материальных благ. Это система элементов с фиксированными свойствами, избирательно вовлеченных, взаимосвязанных, взаимообусловленных в заданных отношениях на получение сфокусированного единого цели-результата.

Таким образом, определение ПС будет включать три важных составляющих элемента: 1. Совокупность элементов: внешней среды; производственного процесса (предметы труда, труд); технико-организационной упорядочности (технология, организация труда, организация производства, управление). 2. Взаимосвязь и обусловленность элементов. 3. Единство цели и целостность.

Ниже изложены требования к организации производства.

Гибкость — перестроение элементов и связей в ПС в соответствии с изменениями внешних условий и внутреннего состояния ПС.

Пропорциональность — согласование входных и выходных параметров элементов, пропускной способности связей (при этом ПС построена из «согласованных» модулей и управляемая с помощью ЭВМ).

Надёжность — резервирование элементов и связей ПС, повышение качества элементов и связей, диагностика их состояния, ремонтпригодность.

Параллельность — построение ТП, дающее возможность одновременного функционирования максимального числа элементов и связей ПС.

Непрерывность — создание оптимального объёма незавершенного производства, снижение длительности межоперационных перерывов, совмещение основного, вспомогательного и обслуживающего процессов (концентрация, кооперация, специализация, комбинирование на этой основе, понижение типа производства, использование роторно-конвейерных линий).

Ритмичность — определение и поддержание оптимального ритма производства.

Прямоточность — построение ТП, исключаящее «обратный ход» предметов труда, размещение оборудования по ходу ТП (поточная форма производства с искусственным поддержанием ритма).

Автоматичность — построение ТП, при котором все частичные процессы и производственный процесс в целом выполняются машинами.

Экологичность — обеспечение организацией ПС выполнения норм и требований, исключающих вредное воздействие процессов производства и продукции на окружающую среду.

Модульность — построение ТП на основе организационных технологических и производственных модулей (поточная форма организации производства).

Совместимость — построение ТП на основе единства целесообразия действующих элементов и их связей в процессе организации системы (комбинирование).

Сосредоточение — подчинение отдельных функций осуществлению одной системной функции (специализация).

Лабильность — сознательное поддержание происходящего процесса развития и эволюции системы повышения уровня её организации.

Таким образом, ПС — это совокупность взаимосвязанных элементов производственного процесса, образующих единое целое и функционирующих в целях производства продукции или оказания услуг. Это особый класс систем, имеющих в своём составе трудящихся, орудия и предметы труда и другие элементы, необходимые для её функционирования.

1.2. Моделирование технических систем (ТС)

1.2.1. Модель и информация

При проектировании технических систем обычно прибегают к моделированию, при котором синтезу и анализу (исследованию) подвергается уже не сам объект проектирования, а его модель. Процесс проектирования по существу представляет собой формирование цепочки последовательно уточняемых моделей. При этом особенностью проектной модели является отсутствие материального объекта оригинала, создание

которого является конечной целью проектирования. Результатом проектирования также является достаточно точная модель технической системы, необходимая и достаточная для ее изготовления и эксплуатации.

Моделью в общем смысле (обобщенная модель) можно называть создаваемый с целью получения и (или) хранения информации специфический объект, который в форме мысленного образа, описания знаковыми средствами (схемы, формулы, графики и т. п.) либо материального предмета отражает свойства, характеристики и связи объекта-оригинала произвольной природы, существенные для задачи, решаемой субъектом (человеком).

Несмотря на некоторую громоздкость этого определения, оно имеет ясный смысл. Модель представляет собой «четырехместную конструкцию», компонентами которой являются:

- *субъект* (человек);
- *задача*, решаемая субъектом;
- *объект-оригинал* (фрагмент реальной действительности);
- *язык описания* или способ материального воспроизводства модели.

Особую роль в этой «конструкции» играет задача. Вводить понятие модели без четкого указания задачи, ради которой она создается, не имеет смысла.

Задачами, которые решаются при помощи моделей, являются: проектирование технических систем, исследование их функционирования; управление техническими системами. Модель имеет существенные преимущества перед оригиналом: наглядность, обозримость, доступность испытаний, легкость оперирования с ним и т. д.

Можно сказать, что каждому материальному объекту соответствует множество различных моделей, связанных с различными задачами. Например, мысленные модели некоторого предприятия, существующие в сознании его директора, главного технолога или главного экономиста, существенно

отличаются, хотя объект-оригинал у них один. Каждое из перечисленных должностных лиц, решая конкретные задачи, «выстраивает» в модель различную информацию о конкретном предприятии.

Паре «задача-объект» тоже соответствует множество моделей, содержащих одну и ту же информацию, но различающихся формами ее представления. Следует всегда помнить, что *модель всегда беднее оригинала, и это ее фундаментальное свойство*. Также важным свойством модели является обязательное наличие *ограничений и допущений*, связанных с решаемой задачей и свойствами объекта-оригинала.

Таким образом, между моделью и действительностью имеются следующие различия.

Модель подобна оригиналу только в конечном числе отношений. Модель проще оригинала. Это не только допустимо, но иногда и необходимо для облегчения использования модели. Из-за конечности и упрощенности *модель только приближенно отображает оригинал. Модель называется адекватной некоторой цели*, если с ее помощью эта цель успешно достигается. *Требование адекватности не совпадает с требованиями полноты, точности и истинности.*

В каждой модели есть доля истины, которая определяется при соотнесении модели и оригинала. Кроме безусловно истинного, в модели есть и верное лишь при определенных условиях и нечто неверное, то есть не имеющее отношения к оригиналу. Мир моделей также системен, так как модель есть системное отображение оригинала. Целесообразная деятельность, которая осуществляется по определенному плану — алгоритму, невозможна без моделирования. По цели модели делятся на *познавательные и прагматические*.

Познавательные модели являются формой организации и представления знаний, средством соединения новых знаний с имеющимися. Если такая модель расходится с действительностью, то ее необходимо изменить в сторону приближения к реальности.

Прагматические модели являются средством управления, средством организации практических действий, способом представления образцово правильных действий или их результата; то есть являются в некотором смысле *эталон*. Если при использовании прагматической модели обнаружится расхождение модели с реальностью, то необходимо предпринять усилия для приближения реальности к модели. Прагматические модели играют роль такого эталона, под который подгоняется как сама деятельность, так и ее результат.

По *воплощению* модели делятся на *материальные* и *абстрактные*. Чтобы модель могла быть отображением технической системы, необходимо наличие между ними *отношений подобия* (похожести). Различают *прямое*, *косвенное* и *условное подобие*.

Прямое подобие устанавливается в процессе испытания (физического взаимодействия). Таким подобием обладают, например, модели плотины, самолета, станка и т. д.

Косвенное подобие объективно существует в природе и обнаруживается в виде совпадения или близости абстрактных математических моделей. Примером такого подобия является электромеханическая аналогия, когда процессы механических и электрических колебаний описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями.

Условное подобие устанавливается в результате соглашения (например, чертежи являются моделью будущей продукции). Такое подобие является способом материального воплощения (отчуждения от сознания) абстрактных моделей для хранения и передачи от человека к человеку (возвращения в абстрактную форму).

Абстрактную (идеальную) модель независимо от природы объекта-оригинала, типа решаемой задачи и способа реализации называют еще *информационной*, то есть *содержащей информацию о реальности*. Изначальный смысл термина «информация» как знания, сведения, сообщения, уведомления, известия, то есть то, что извлекается из образа в про-

цессе его «осознания» и соотнесения с отображаемой системой и присущее только человеческому сознанию и общению, в некоторых ситуациях теперь рассматривается как фундаментальное свойство материи. В потоке информации, которая циркулирует внутри технической системы и между техническими системами, можно выделить следующие процессы.

Восприятие — процесс целенаправленного извлечения информации (оценка наличия информации, измерение), в результате которого получается сигнал в форме, удобной для осуществления других процессов. При восприятии часто приходится отделять полезную информацию от вредной, искажающей реальность (от шума).

Передача информации состоит в ее переносе на некоторое расстояние посредством сигналов различной физической природы соответственно по механическому, гидравлическому, пневматическому, акустическому, оптическому, электрическому или электромагнитному каналу. Информация переносится последовательностью сигналов. Так как один и тот же объект может выступать в качестве носителя разных сигналов, то, очевидно, что в качестве сигналов используются не сами по себе объекты, а их состояния. Но не всякое состояние обладает сигнальными свойствами.

Обработка информации состоит в ее хранении, сравнении, классификации, преобразовании и т. д. Выполняется она в соответствии с поставленной целью. Информация хранится на каком-либо носителе (мозг, бумага, диск и т. д.).

Представление информации выполняется для человека с помощью демонстрации условных изображений, которые содержат ее качественные и количественные характеристики.

Воздействие информации состоит в том, что сигналы, несущие ее, инициируют процессы: изменения в системе, регулирования, защиты и управления. То есть играют роль своеобразного катализатора, направителя энергетического и материального потоков.

В качестве примера на рисунке 1.6 показана схема управления рабочим циклом круглошлифовального станка с по-

мощью измерительного устройства ИУ, счетно-логического устройства СЛУ и исполнительного устройства ИсУ. Это управление обеспечивает за время рабочего цикла в зависимости от оставшегося припуска Π (удаляемого слоя материала с заготовки 1) необходимое изменение скорости радиальной подачи S . При помощи измерительных рычагов 2 ИУ воспринимает информацию о значении Π . Этот механический сигнал (перемещение) в ИУ преобразуется в электрический (напряжение), пропорциональный значению Π , и затем передается в СЛУ. В СЛУ производится обработка полученного сигнала (сравнение с заданными значениями Π_1 и назначение сигнала, пропорционального скорости подачи) и формирование сигнала, пропорционального скорости подачи S . Этот сигнал передается в ИсУ, где преобразуется в скорость перемещения шлифовальной бабки 4. Когда заданный припуск удален, то есть $\Pi = 0$, вырабатывается сигнал на быстрый отвод бабки шлифовального круга в исходное положение.

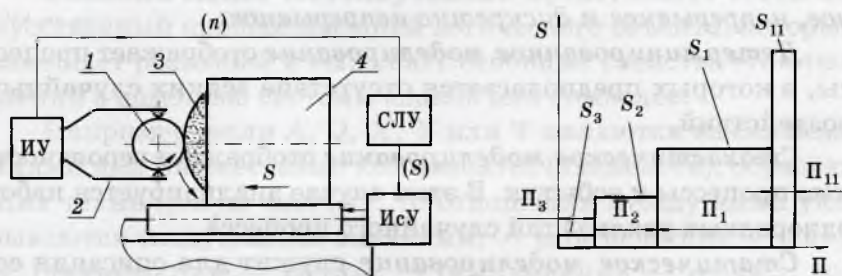


Рис. 1.6. Схема системы управления круглым врезным шлифованием:

1 — заготовка; 2 — измерительные рычаги; 3 — шлифовальный круг; 4 — шлифовальная бабка

Условия, обеспечивающие установление и сохранение сигнального соответствия, называют *кодом*. Правила построения и способы использования сигналов (кодов) для передачи информации с помощью автоматизированных устройств называют *кодированием* и *декодированием*. Сигналы могут быть *статическими* (книга, фотография, состояние памяти

ЭВМ и т. д.) и *динамическими* (изменение состояния электромагнитного поля или поля сил упругости в газе). Статические сигналы используются преимущественно для хранения информации, а динамические — для ее передачи. В соответствии с характером сигналов различают статические и динамические системы.

Сигналы в технических системах играют особую, очень важную роль. Если энергетические и материальные потоки, образно говоря, питают систему, то потоки информации, переносимые сигналами, организуют все ее функционирование, управляют ею.

1.2.2. Виды моделирования технических систем

В зависимости от характера анализируемых и отображаемых процессов, протекающих в технической системе, различают следующие виды моделирования: *детерминированное* и *стохастическое*, *статическое* и *динамическое*, *дискретное*, *непрерывное* и *дискретно-непрерывное*.

Детерминированное моделирование отображает процессы, в которых предполагается отсутствие всяких случайных воздействий.

Стохастическое моделирование отображает вероятностные процессы и события. В этом случае анализируется набор однородных реализаций случайного процесса.

Статическое моделирование служит для описания состояния объекта моделирования в определенный момент времени.

Динамическое моделирование отражает поведение объекта моделирования во времени.

Дискретное моделирование служит для описания процессов, которые предполагаются дискретными. Например, процесс изготовления любой детали является дискретным.

Непрерывное моделирование позволяет отразить непрерывные процессы, протекающие в технической системе. Например, процесс нагрева и охлаждения станка во время его работы с перерывами.

Дискретно-непрерывное моделирование используется для случаев, когда необходимо выделить наличие как дискретных, так и непрерывных процессов в технической системе.

Каждый из указанных видов моделирования отражает только одну сторону описания. Так, динамическое моделирование может быть также и детерминированным, дискретным или непрерывным.

В зависимости от способа представления (отражения) технической системы можно выделить *мысленное* или *реальное моделирование*.

Мысленное моделирование может быть реализовано в виде *наглядного* или *символического моделирования*.

При *наглядном моделировании* на базе представлений человека о реальных объектах и процессах создаются различные наглядные модели, отражающие интересующие его вопросы. Например, схемы, графики, чертежи и т. д.

Символическое моделирование представляет собой искусственный процесс создания логического объекта, который замещает реальный и выражает основные свойства его отношений с помощью системы знаков или символов.

Например, если A , Q , X , Y или Ψ являются высказываниями или множествами компонентов (элементов), образующих техническую систему, то отношения между ними указываются следующими значками: \wedge (конъюнкции — «и»), \vee (дизъюнкции — «или»), \rightarrow (импликации — «если..., то» или «из...следует»), \neg (отрицание) и т. д. Отношения иерархии обозначаются следующим образом: $a_i \in A$ или $a_i \notin A$. Это означает, что компонент a_i принадлежит или соответственно не принадлежит системе A . Иерархические отношения могут также обозначаться при помощи кванторов общности \forall «для всех» или «для любого», и существования \exists «существует».

Выражение $\forall x \in X$ обозначает: для любого x из множества X . А выражение $\exists x \in X$ обозначает, что существует хотя бы один компонент x из множества X . Качественное сравнение компонентов (технических систем) осуществляется значками: \succ — (лучше) или \prec — (хуже).

Записанное ниже выражение

$$\exists(P_i \perp P_j) \wedge ((O_l \perp P_j) \wedge (O_l // P_i)) \wedge (O_{21} \perp P_i)$$

$$T \perp O_{21} \rightarrow PTX(P_j) < TY(O_l) \Rightarrow P_i = \text{УСТ}; P_j = \text{НАПР}; O_l = \text{ОПР};$$

означает: если существует комплект технологических баз, состоящий из двух взаимно перпендикулярных плоскостей $P_i \perp P_j$ и оси $(O_l \perp P_j)$, перпендикулярной одной из них, и задан допуск перпендикулярности оси O_{21} относительно плоскости P_j , а допуск линейного размера относительно P_j [TX(P_j)] меньше допуска линейного размера относительно O_l [TY(O_l)], то плоскость P_i назначается установочной базой, плоскость P_j — направляющей, ось O_l — опорной.

Одним из видов символического моделирования является *математическое моделирование*. В этом случае реальному объекту или процессу ставится в соответствие некоторый математический объект, который называется *математической моделью*. Исследование математической модели позволяет получать характеристики рассматриваемого реального объекта.

Математическое моделирование для исследования характеристик процесса функционирования технической системы и определения ее показателей можно разделить на *аналитическое, имитационное и комбинированное*.

При *реальном моделировании* используется возможность исследования различных характеристик либо на реальном объекте, либо на его части. Такие исследования могут проводиться как на объектах, работающих в нормальных режимах, так и при организации специальных режимов для оценки интересующих исследователя характеристик. Реальное моделирование является наиболее объективным и точным, но его возможности ограничены. Например, проведение реального моделирования вновь проектируемого станка потребует, во-первых, создания такого станка, а во-вторых, приобретения контрольно-измерительных приборов.

Натурным моделированием называют проведение исследований на реальном объекте с последующей обработкой результатов. Такие разновидности натурного моделирования,

как *производственный эксперимент* и *комплексные испытания* обладают высокой степенью достоверности. Другим видом реального моделирования является *физическое моделирование*. Оно отличается от натурального тем, что исследование проводится на установках, которые сохраняют природу исследуемых явлений и обладают физическим подобием. К таким установкам можно отнести аналоговые или цифровые ЭВМ.

Для *аналитического моделирования* характерно то, что процессы в технической системе отражаются в виде алгебраических, дифференциальных, интегральных, конечно-разностных уравнений или логических условий (*аналитических моделей*). Аналитическая модель может быть исследована одним из следующих методов:

- *аналитическим* методом, когда удается получить явные зависимости для искоемых характеристик;
- *численным* методом, когда уравнения в общем виде не решаются, а есть возможность получить числовые результаты для конкретных начальных и граничных условий.

Наиболее полное исследование процесса функционирования технической системы можно провести, если известны явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и показателями исследуемой системы. Однако такие зависимости удается получить только для сравнительно простых систем. При усложнении систем исследование их аналитическим методом наталкивается на значительные трудности, которые часто бывают непреодолимыми. Численный метод по сравнению с аналитическим позволяет исследовать более широкий класс систем, но при этом решение носит частный характер.

При *имитационном моделировании* алгоритм, реализующий модель на ЭВМ, воспроизводит процесс функционирования технической системы, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания

во времени. Это позволяет по исходным данным, спланировав и поставив численный эксперимент, получить сведения о состоянии процесса в определенные моменты времени и оценить характеристики системы.

Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие непрерывных и дискретных элементов, их нелинейных характеристик, случайных воздействий и др., что создает непреодолимые трудности при аналитических исследованиях. Имитационное моделирование часто является единственным практически доступным методом получения информации о поведении сложной технической системы, особенно на этапе ее проектирования.

Комбинированное (аналитико-имитационное) **моделирование** при анализе и синтезе технических систем позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей проводится предварительное разделение процесса функционирования системы на составляющие процессы. И для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели. А для остальных подпроцессов строятся имитационные модели.

1.2.3. Виды моделей

В зависимости от средств моделирования различают следующие виды моделей:

иконические, отображающие оригинал в двух- или трехмерном измерении, по необходимости в уменьшенном или увеличенном масштабе (чертежи, схемы, объемные модели машин, фотографии);

аналоговые, воссоздающие, например, статические и динамические свойства оригинала (графы, диаграммы, графики, физические модели, в которых используется подобие явлений и процессов, и имитационные модели, отображающие

поведение оригинала с помощью ЭВМ); *символические*, отображающие свойства и отношения оригинала с помощью слов или математических символов (описания с помощью естественного или специализированного языка, аналитические (детерминированные или стохастические) модели и логические модели, которые переводят реальную систему и отношения в ней на язык алгебры логики).

Модель типа «черный ящик» — такая символическая модель отражает целостность и неполную обособленность системы от окружающей среды. Она не дает информации о внутреннем строении системы. Из бесконечного числа связей системы с окружающей средой в модели типа «черный ящик» отображаются только те, которые важны для решения поставленной задачи. При этом существует вероятность ошибочного включения несущественных связей и не включения существенных.

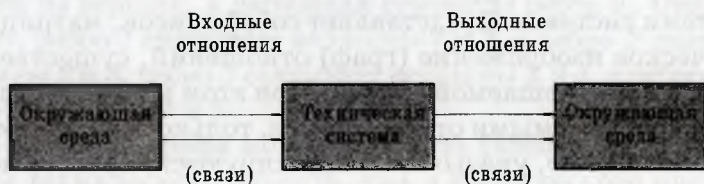


Рис. 1.7. Схема модели типа «черный ящик»

Моделью типа «черный ящик» может быть не только схема, показанная на рисунке 1.7, но и перечень (список) входных и выходных отношений с подробным их описанием. Например, в таблице 1.2 показана модель процесса течения типа «черный ящик». Такая модель обычно используется для начального наиболее абстрактного описания проектируемой системы.

Модель состава дает иерархическое описание (разной степени абстрактности) тех компонентов, из которых состоит система. Примером такой модели может служить документ (спецификация), в котором приводится перечень шифров (кодов) узлов и деталей устройства.

Таблица 1.2

Модель процесса точения типа «черный ящик»

Список входов	Список выходов
Средняя твердость материала заготовки, $HВ$	Фактический размер детали, A_{Φ}
Диапазон изменения твердости, $\omega HВ$	Диапазон изменения размера детали, ωA_{Φ}
Средний размер заготовки, Z_r	Показатель шероховатости, Ra
Диапазон изменения размера заготовки, ωZ_r	Составляющая силы резания, P_z
Размер настройки, A_n	Составляющая силы резания, P_y
Заданный размер, A	Составляющая силы резания, P_x
Жесткость технологической системы, j	Средняя стойкость инструмента, T
Подача, S	Диапазон изменения стойкости, ωT
Скорость резания, v	
Передний угол резца, γ	
Угол в плане, ϕ	

Модель структуры отображает отношения между компонентами системы. Представляет собой список, матрицу или графическое изображение (граф) отношений, существенных с точки зрения решаемой задачи. При этом компоненты, связанные описываемыми отношениями, только обозначаются и, в крайнем случае, указываются (кодируются) некоторые различия между ними. Различают модели пространственных, временных, логических и функциональных структур.

Граф состоит из обозначений компонентов любой природы, называемых вершинами, и обозначений связей между ними, называемых ребрами или иногда дугами. Данная пара вершин может быть соединена любым количеством ребер. Однако модель структуры может быть представлена не только в графической форме, но и в форме матриц смежности или инцидентности. Последние используются, если граф необходимо представить в ЭВМ.

В квадратной матрице смежности наружный столбец и строка составлены из вершин, знак 1 указывает, что между соответствующими вершинами есть связь, а знак 0 — , что

ее нет. Вместо 1 можно проставлять число или символ, отражающий уровень связи. Например, на рисунке 1.8 показана матрица смежности, которая показывает, что вершина 1 имеет связи с вершинами 2 и 5, а вершина 2 имеет связи с вершинами 3 и 4.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
x_1	0	1	0	0	1
x_2		0	1	1	0
x_3			0	0	0
x_4				0	0
x_5					0

	u_1	u_2	u_3	u_4
x_1	1	0	0	1
x_2	1	1	1	0
x_3	0	1	0	0
x_4	0	0	1	0
x_5	0	0	0	1

Рис. 1.8. Матрица смежности Рис. 1.9. Матрица инцидентности

В матрице инцидентности (рис. 1.9) наружный столбец составлен из вершин, а наружная строка из ребер u . Она показывает, ребро 1 связывает вершины 1 и 2, а ребро 2 связывает вершины 2 и 3, ребро 3 связывает вершины 2 и 4, а ребро 4 связывает вершины 1 и 5.

С помощью графа можно отразить (изобразить) структуру как технического объекта, так и технического процесса. Например, с помощью графа размерных связей отображается геометрическая структура деталей, то есть отношения между ее типовыми элементами (типовыми поверхностями). Для детали, показанной на рисунке 1.10, на рисунке 1.11 приведены два различных метода представления графа размерных связей. Вершинами графа являются номера поверхностей, а ребрами — связывающие их размеры. Поверхностями являются также оси и плоскости симметрии (оси цилиндров 5 и 7, которые обозначаются соответственно O_5 и O_7). С помощью такого графа можно по следующим формальным правилам проверить правильность простановки размеров на чертеже: 1. На графе не должно быть оторванных вершин. Их наличие означает, что не хватает размеров. 2. На графе не должно

быть замкнутых контуров. Их наличие означает, что проставлены лишние размеры. 3. Группа механически обработанных поверхностей должна иметь с группой исходных (полученных окончательно на стадии изготовления заготовки) только одно общее ребро. Это обеспечивает заданную точность взаимного расположения внутри указанных групп поверхностей при механической обработке детали.

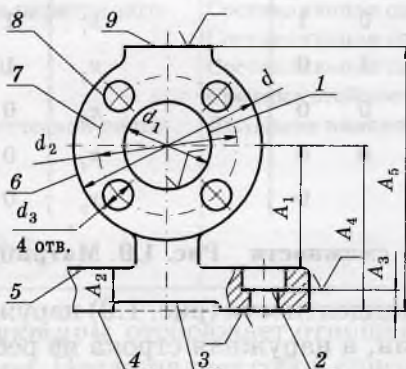
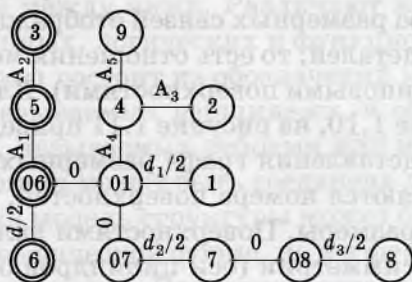


Рис. 1.10. Эскиз детали:

1-6, 8, 9 — поверхности; 7 — осевая линия



1		
01	1	$d1/2$
2	4	A3
3	5	A2
4	9	A5
5	06	A1
6	06	$d/2$
06	01	0
7	07	$d2/2$
07	01	0
8	08	$d3/2$
08	7	0

Рис. 1.11. Граф и таблица размерных отношений

На рисунке 1.12 показан граф вариантов процесса обработки некоторой поверхности. Вершинами этого графа являются показатели состояния данной поверхности (код формы, размеры, допуски, шероховатость и т. д.), а ребрами — либо коды методов преобразования (обработки), либо затраты времени на преобразование. С помощью такого графа можно выбрать наилучший (по минимуму затрат времени) вариант маршрута обработки.

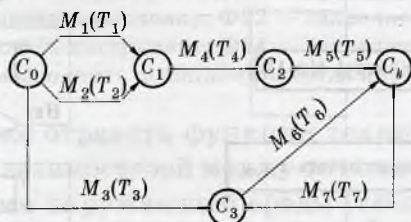


Рис. 1.12. Граф вариантов обработки типовой поверхности

Развитием модели процесса в виде графа являются схемы алгоритмов, программ и систем (ГОСТ 19.701–90). В таком графе вершинами являются условные графические обозначения процессов, решений, операций, носителей данных и т. д. Внутри условных обозначений могут быть указаны выполняемые действия и условия перехода (выбор пути). Примеры таких схем показаны на рисунке 1.13.

В первом случае из схемы ясно, что аргумент X изменяется в пределах от 0 до 2,5 и пока $X < 1$, вычисление Y выполняется по одной функции, а в других случаях — по другой. Схема алгоритма управления отражает процессы, проходящие в счетно-логическом устройстве (СЛУ на рис. 1.6). Здесь измерительное устройство (ИУ) посылает в СЛУ сигнал, пропорциональный припуску Π , который осталось снять. В зависимости от значения Π СЛУ передает в исполнительное устройство сигнал (команду) об изменении скорости радиальной подачи от ускоренной (S_2) до отделочной (S_3).

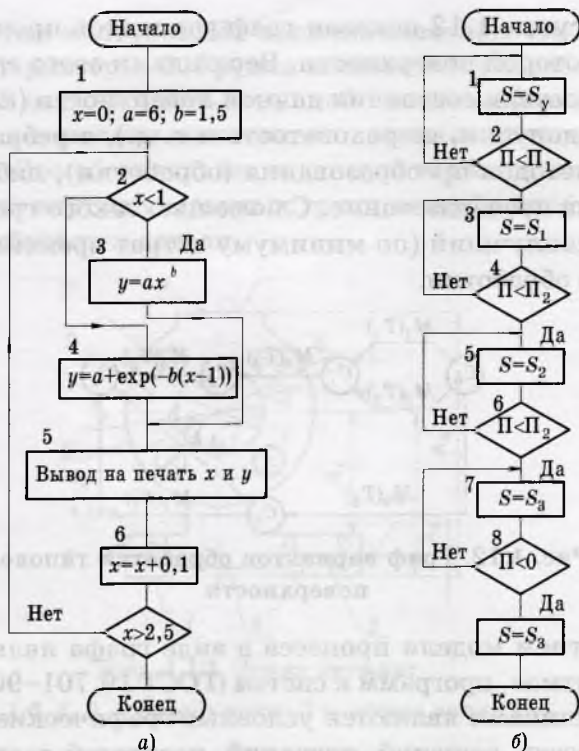


Рис. 1.13. Схема алгоритма:

а — вычисления; б — управления

При относительно подробном описании вершин или блоков схема алгоритма в определенной мере начинает отображать конфигурацию системы.

Функциональная модель технической системы (компонента) — это графическое изображение (в виде иерархической структуры) или математическое представление (в виде матрицы) состава и взаимосвязей ее функций.

В некоторых случаях описание функций технической системы удобно представлять в виде иерархической древовидной картинкой, в которой сложная функция раскладывается на более простые по уровням иерархии (рис. 1.14).

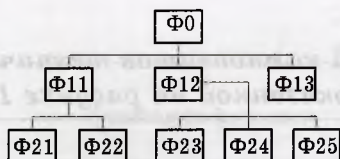


Рис. 1.14. Дерево функций операции механической обработки:

- Ф0 — обработать заготовку, выдержав заданные показатели качества;
 Ф11 — установить (снять) заготовку; Ф12 — выполнить размерную настройку; Ф13 — выполнить движения формообразования;
 Ф21 — базировать заготовку; Ф22 — закрепить заготовку;
 Ф23 — базировать инструмент; Ф24 — закрепить инструмент;
 Ф25 — выполнить позиционирование инструмента

Можно также отразить функции технической системы в виде таблицы взаимосвязей между ее компонентами, а также компонентами окружающей среды (табл. 1.3). Согласно таблице 1.3 компонент К1, например, оказывает на компонент К2 действие, описанное в функциях Ф1 и Ф4, а компонент К2 оказывает на К3 действие, описанное в функции Ф5 и т. д. Наиболее просто функции технической системы отражаются списком по форме, указанной в таблице 1.4.

Схемные модели являются частным случаем иконических моделей. Различают кинематические, гидравлические, электрические, расчетные, конструктивные и технологические схемные модели, в той или иной степени отражающие конфигурацию системы. В некоторых случаях для решения задачи необходимы комбинированные (электрогидравлические, кинематикогидравлические и т. д.) схемные модели.

Таблица 1.3

Взаимосвязи между компонентами технической системы

Компоненты	К1	К2	К3	К4	К5
К1	—	Ф1; Ф4	Ф3	—	—
К2	—	—	Ф5	Ф2; Ф7	—
К3	—	—	—	—	Ф6
К4	—	—	—	—	Ф9

Таблица 1.4

**Список функций компонентов технической системы,
показанной на рисунке 1.1**

Компонент — носитель функции	Описание функции	Ранг функции
Корпус 1	Ориентирует обойму 5 и подшипники 18, воспринимает силы. Обеспечивает крепление к станине	ОФ ДФ
Втулка 2	Взаимно ориентирует наружные кольца подшипников 11, обеспечивая необходимый натяг при завинчивании до упора кольца 6	ОФ
Втулка 3	Взаимно ориентирует внутренние кольца подшипников 11, обеспечивая необходимый натяг при завинчивании до упора гайки 8	ОФ
Прокладка 4	Обеспечивает регулировку зацепления конических венцов вал-шестерни 9 и зубчатого колеса 15 за счет изменения ее толщины	ВФ
Обойма 5	Ориентирует наружные кольца подшипников 11 и втулку 2, воспринимает осевую силу при завинчивании кольца 6	ОФ
Вал-шестерня 9	Воспринимает движение и крутящий момент от зубчатого колеса 15, ориентирует внутренние кольца подшипников 11, втулки 3 и 10, обеспечивает силовое замыкание в подшипниках 11 при завинчивании гайки 8	ОФ
Подшипники 11	Оrientируют вал-шестерню 9, оставляя одну степень свободы — вращение вокруг своей оси, воспринимают радиальную и осевую нагрузку	ОФ
Винты 12	Крепят обойму 5 к корпусу 1, воспринимают осевую нагрузку	ОФ
Гайка 13	Обеспечивает осевую ориентацию зубчатого колеса 15 на валу 19	ОФ
Шайба 14	Предохраняет гайку 13 от самоотвинчивания	ВФ
Зубчатое колесо 15	Воспринимает движение и крутящий момент от вала 19 через шпонку 16 и передает вал-шестерне 9	ОФ

Компонент — носитель функции	Описание функции	Ранг функции
Вал 19	Ориентирует зубчатые колеса 21 и 15, воспринимает движение и крутящий момент от зубчатого колеса 21 через шпонку 22 и передает через шпонку 16 зубчатому колесу 15	ОФ
Втулка 20	Обеспечивает натяг в подшипниках 18 при завинчивании до упора болта 23	ОФ

Упрощенная кинематическая схемная модель привода винторезного станка показана на рисунке 1.15, где условные обозначения компонентов и связей позволяют упрощенно отобразить конфигурацию станка (функциональные компоненты и связи между ними). На такой модели не раскрывается структура компонентов (настройки и изменения направления движения). На кинематической схеме привода главного движения (вращения фрезы) фрезерного станка (рис. 1.16) конфигурация привода отображена более подробно. Указаны не только валы, подшипники, способ крепления шестерен (неподвижное или подвижное соединение), но и количество зубьев последних, что позволяет вычислять возможные варианты частоты вращения шпинделя.

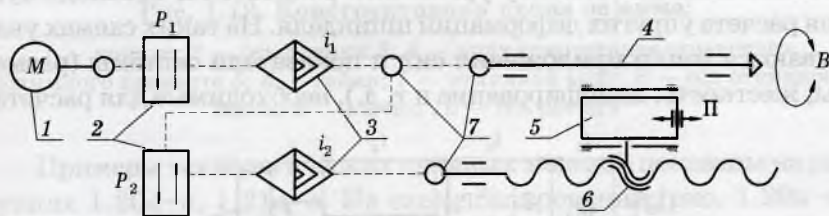


Рис. 1.15. Упрощенная кинематическая схема винторезного станка:

- 1 — двигатель; 2 — компоненты изменения направления движения;
 3 — компоненты изменения скорости движения;
 4 — шпиндель; 5 — суппорт; 6 — винтовая пара;
 7 — кинематическая связь

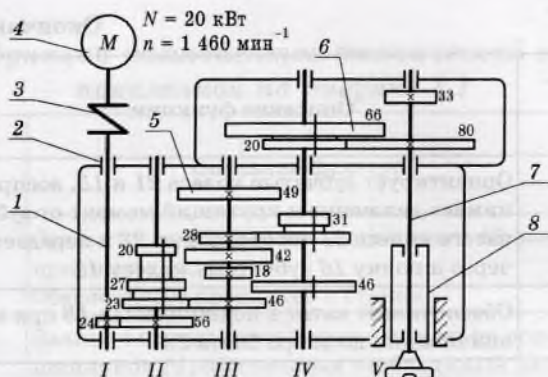


Рис. 1.16. Кинематическая схема привода главного движения фрезерного станка:

1 — вал I; 2 — подшипник; 3 — муфта; 4 — двигатель; 5, 6 — шестерни;
7 — вал V; 8 — пиноль

Для этого составляется уравнение кинематического баланса. Для варианта включения, показанного на рисунке 1.16, оно имеет вид:

$$n_{\text{шп}} = 1460 \cdot \frac{24}{56} \cdot \frac{23}{46} \cdot \frac{28}{42} \cdot \frac{20}{80} = 52,14.$$

Всего возможны 18 вариантов частот вращения шпинделя.

Расчетная схемная модель, показанная на рисунке 1.17, позволяет записать систему уравнений равновесия, необходимую для расчета упругих деформаций шпинделя. На таких схемах указываются точки приложения сил и показатели системы (размеры, жесткость, демпфирование и т. д.), необходимые для расчета.

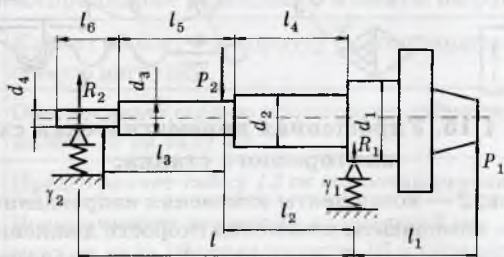


Рис. 1.17. Расчетная схема

На рисунках 1.18 и 1.19 показаны варианты конструктивных схемных моделей. Они отличаются степенью абстрактности. Примером наиболее абстрактной является схема слесарных тисков, более подробной и информативной является схема рычажно-винтового зажима. Полной конструктивной моделью системы (технического средства) является комплект рабочих чертежей и описание технических требований.

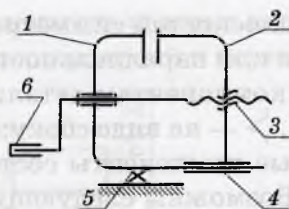


Рис. 1.18. Упрощенная конструктивная схема тисков

- 1 — станина с неподвижной губкой;
- 2 — подвижная губка;
- 3 — винтовая пара;
- 4 — подвижное соединение;
- 5 — закрепление корпуса;
- 6 — рукоятка привода винта



Рис. 1.19. Конструктивная схема зажима:

- 1 — корпус; 2 — ось планки 3; 4 — винт самоустанавливающего зажимного элемента 5; 6 — гайка; 7 — откидной винт; 8 — ось откидного винта; 9 — рычаг; 10 — ось рычага

Примеры технологических схемных моделей показаны на рисунках 1.20а-в, 1.21а-в. На схеме базирования (рис. 1.20а-в) изображается геометрическая (графическая) модель заготовки (ГМЗ) в состоянии, которое заготовка получает после выполнения технологической операции. На ГМЗ жирными линиями выделяют поверхности, которые были обработаны на рассматриваемой операции, проставляются размеры от ранее обработанных компонентов детали (поверхностей, осей

или плоскостей симметрии) и требования к перпендикулярности или параллельности по отношению к ранее обработанным компонентам детали. Указанные условными значками (∇ , \succ — на виде сбоку; \diamond — на виде сверху) ранее обработанные компоненты составляют комплект технологических баз. Возможны следующие варианты комплектов технологических баз: 1) *три взаимно перпендикулярные плоскости*; 2) *плоскость и две оси, перпендикулярные к ней*; 3) *две взаимно перпендикулярные плоскости и ось, перпендикулярная одной из них*; 4) *плоскость и две оси, одна из которых перпендикулярна к плоскости, а другая — параллельна*.

На схеме базирования указанные ранее условные значки указывают точки технологических баз (точки сопряжения), при помощи которых ГМЗ ориентируется относительно «*базовой*» (или *собственной*) координатной системы. Необходимо учитывать, что точки сопряжения лежат одновременно на технологических базах и на плоскостях (осях) базовой системы координат. Каждая точка сопряжения характеризует *связь*, то есть определенность координаты элемента ГМЗ в базовой системе координат. Номера накладываемых связей (от 1 до 6) указываются рядом с условными значками точек сопряжения. Каждый компонент комплекта технологических баз накладывает на ГМЗ разное количество связей, обеспечивающих определенность относительного расположения. На схеме базирования обязательно указываются оси базовой системы координат.

Если комплект технологических баз состоит из трех взаимно перпендикулярных плоскостей, то одна из них накладывает три параллельные связи и условно называется *установочной базой*. Вторая плоскость, накладывающая две параллельные связи, называется *направляющей базой*. А третья плоскость может накладывать только одну связь и называется *опорной базой*. Установочная база накладывает три связи (определенность линейной координаты по одной из осей и определенность угловых координат поворота относительно двух других осей собственной системы координат). Направляющая база накладывает две связи (определенность линейной координаты по одной из осей соб-

ственной системы координат и определенность угловых координат поворота относительно оси, перпендикулярной к первой).

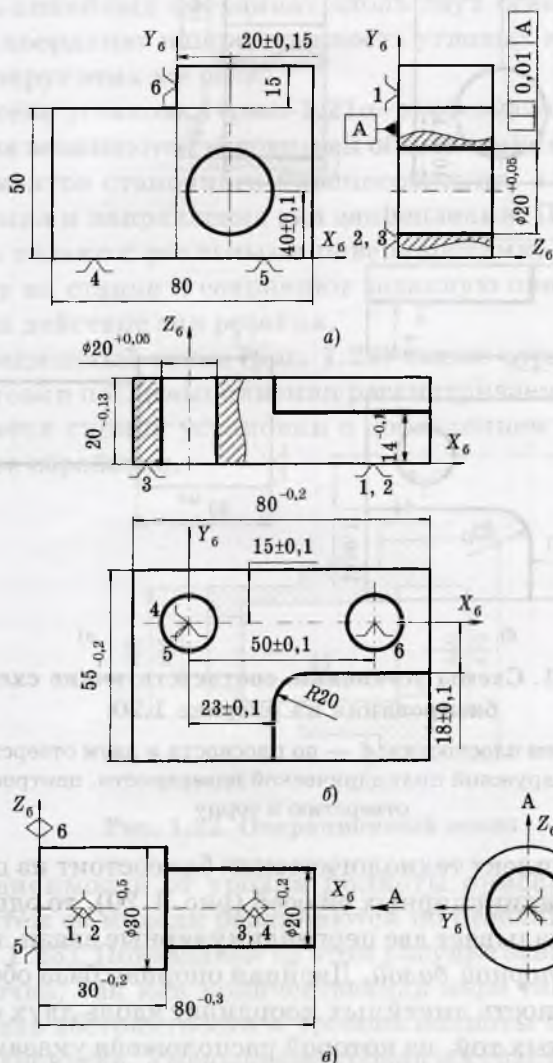


Рис. 1.20. Схемы базирования заготовок:

а — по плоскостям; б — по плоскости и двум отверстиям;
в — по наружной цилиндрической поверхности и торцу

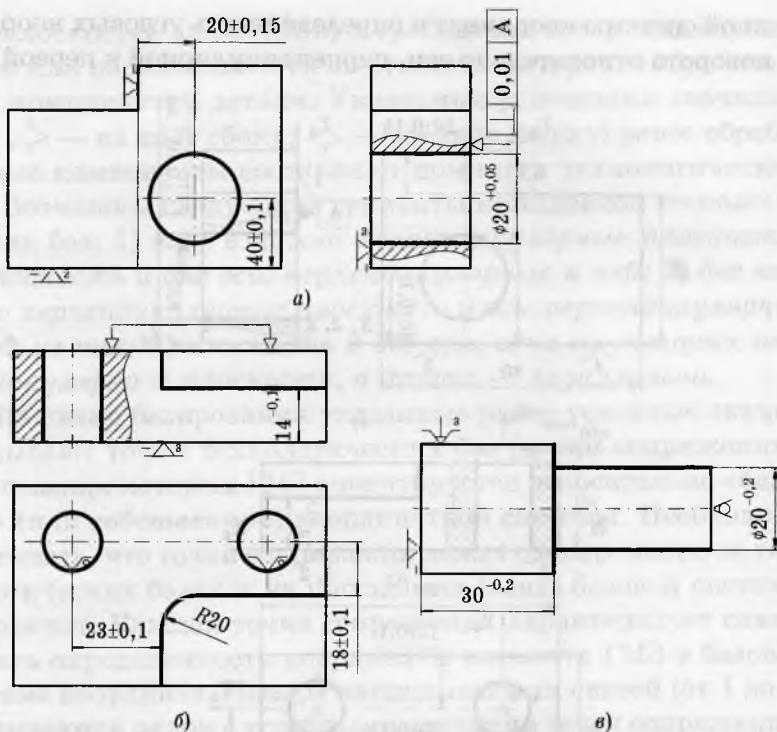


Рис. 1.21. Схемы установки, соответствующие схемам базирования на рисунке 1.20:

- а* — по трем плоскостям; *б* — по плоскости и двум отверстиям;
в — по наружной цилиндрической поверхности, центрному отверстию и торцу

Если комплект технологических баз состоит из плоскости и двух перпендикулярных ей осей (рис. 1.20), то одна из них, которая накладывает две перпендикулярные связи, называется *двойной опорной базой*. Двойная опорная база обеспечивает определенность линейных координат вдоль двух осей, перпендикулярных той, на которой расположена указанная база.

Таким образом, плоскость может быть установочной, направляющей или опорной базой. Ось может быть направляющей, двойной опорной или опорной базой. Кроме того, длин-

ная ось может быть двойной направляющей базой, которая накладывает четыре связи. Две из них обеспечивают определенность линейных координат вдоль двух осей собственной системы координат и определенность угловых координат поворота вокруг этих же осей.

На схеме установки (рис. 1.21а-в) обозначения точек сопряжения заменяются условными обозначениями установочных элементов станочного приспособления, а также точки приложения и направление сил закрепления. Последние, сопрягаясь только с реальными поверхностями, ориентируют заготовку на станке и сохраняют заданную ориентацию, несмотря на действие сил резания.

Операционный эскиз (рис. 1.22) также отражает состояние заготовки после выполнения рассматриваемой операции. Он является схемой установки с добавлением информации о качестве обработки.

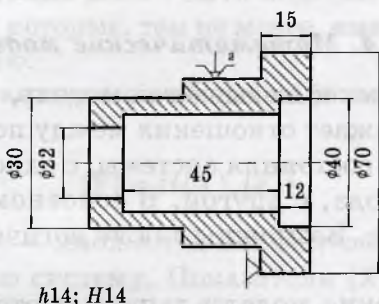


Рис. 1.22. Операционный эскиз

В зависимости от уровня полноты описания технических систем ее модели различаются по степени абстрактности (рис. 1.23). Показанная на этом рисунке зависимость ориентировочна, так как количественная мера таких понятий, как степень абстрактности и уровень полноты описания точно не установлена. Уменьшение уровня абстрактности модели осуществляется путем установления (и добавления к описанию) некоторых качественных и (или) количественных показателей ее компонентов и системы в целом.

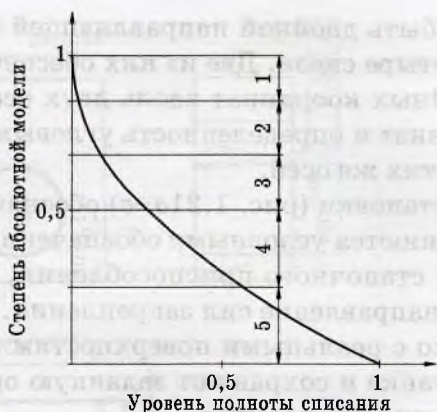


Рис. 1.23. Схема зависимости степени абстрактности модели ТС от уровня полноты ее описания:

1 — модель типа «черный ящик»; 2 — модель структуры; 3 — модель конфигурации; 4 — конструктивная схема; 5 — рабочая документация

1.2.4. Математические модели

Математической называется модель, которая в знаковой форме отображает отношения между показателями входа и внутреннего состояния системы, с одной стороны, и показателями выхода, с другой. В основном это отношения типа: =, >, <, ≤, ≥. Возможны также логические отношения (см. п. 1.2.2).

Математические модели записываются в виде аналитических, дифференциальных или интегральных выражений (уравнений, неравенств). Зададимся вопросом: является ли моделью следующее уравнение:

$$A \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + x = ku(t).$$

Для ответа на этот вопрос следует обратиться к приведенному выше определению модели как «четырёхмерной конструкции». Сразу можно сказать, что ни о каком объекте-оригинале и ни о какой задаче, которую решает субъект, в приведенном уравнении речь не идет. Следовательно, са-

мо по себе приведенное уравнение является не моделью, а абстрактной математической конструкцией, а именно — неоднородным линейным дифференциальным уравнением второго порядка.

Однако если рассмотреть $u(t)$ как изменение во времени входного напряжения в контуре, который содержит индуктивность, емкость и сопротивление, а x как выходное напряжение, то получим математическую модель соответствующей электрической схемы. Она будет отражать физические процессы, проходящие в рассматриваемом контуре.

При другой интерпретации переменных и параметров то же уравнение обратится в модель механической системы с аккумуляторами потенциальной и кинетической энергии, а также с трением, годную для решения задачи о перемещении компонентов этой системы во времени.

Из приведенного примера видно, что одна и та же математическая конструкция может быть моделью различных физических объектов, которые, тем не менее, имеют глубокую внутреннюю аналогию.

Аналитическая модель в общем виде записывается следующим образом

$$\{Y\} = f(\{X\}, \{Z\}),$$

где $\{Y\}$, $\{X\}$ и $\{Z\}$ — множества показателей, характеризующих техническую систему. Показатели $\{X, Z\}$ входа и внутреннего состояния системы будем называть *факторами*. Здесь $\{X\}$ — множество управляемых (контролируемых) факторов. Элементы неконтролируемого множества факторов $\{Z\}$ могут оставаться постоянными или изменяться во времени (монотонно или случайным образом):

$$\{X\} = \{W\} + \{U\},$$

где каждый элемент множества факторов $\{W\}$ имеет известное, постоянное значение, а значения элементов множества факторов $\{U\}$ могут изменяться или по крайней мере наблюдаться исследователем. Значение фактора будем называть его *уровнем*.

Множество показателей выхода $\{Y\}$ будем называть *откликом*. Изменение уровня отклика под действием монотонно изменяющихся во времени неконтролируемых факторов будем называть *дрейфом отклика*.

Множество возможных уровней факторов называют *факторным пространством*. Геометрические модели одно- двух- и трехмерного факторного пространства показаны на рисунке 1.24. Если число факторов больше трех, то геометрическое отображение факторного пространства становится невозможным. В таких случаях оно отображается матрицей следующего вида:

$$\Phi\Pi = \begin{pmatrix} X_{1\min} & X_{1\max} \\ X_{2\min} & X_{2\max} \\ \dots & \dots \\ X_{(k-1)\min} & X_{(k-1)\max} \\ X_{k\min} & X_{k\max} \end{pmatrix},$$

где $X_{j\min}$ и $X_{j\max}$ — отражают допустимые границы изменения уровней j -го фактора; k — количество факторов.

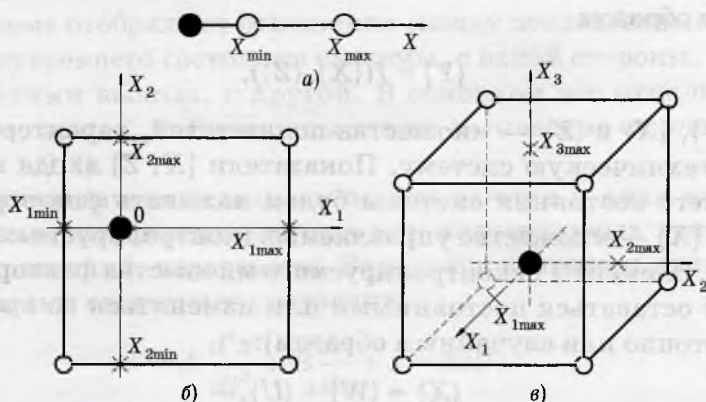


Рис. 1.24. Геометрические модели факторного пространства

Точкой *факторного пространства* называют совокупность конкретных уровней всех факторов. Ее можно отобразить с помощью матрицы-столбца

$$\text{ФП} = \begin{vmatrix} X_{1i} \\ X_{2i} \\ \dots \\ X_{(k-1)i} \\ X_{ki} \end{vmatrix}.$$

К управляемым факторам предъявляются следующие требования:

управляемость — возможность поддерживать выбранный уровень фактора в течение необходимого (например, для измерения) отрезка времени;

независимость — возможность задать любой (в пределах факторного пространства) уровень данного фактора вне зависимости от уровней других факторов;

совместимость — безопасность функционирования системы и возможность измерения отклика в любой точке выделенного факторного пространства;

точность измерения и оценки должна быть достаточной для достижения поставленной цели исследования.

При выборе отклика из нескольких, обычно функционально связанных показателей результата функционирования системы должно учитываться следующее:

— необходимо, чтобы отклик был *однозначным* в статистическом смысле, то есть заданному набору уровней факторов должно соответствовать одно (с точностью до поля рассеяния под действием неконтролируемых факторов) значение отклика;

— отклик должен быть *эффективным* в статистическом смысле. Это значит, что из нескольких функционально связанных откликов выбранный можно измерить с наибольшей точностью.

Математические модели могут быть простыми и сложными, а последние — однородными и неоднородными. *Простая модель* отражает поведение простой (упрощенной) системы (колебания математического маятника). *Сложная однородная*

модель отражает поведение сложной, состоящей из нескольких компонентов, системы. Причем результат функционирования системы определяют процессы, относящиеся к одному классу (механические, тепловые, электромагнитные и т. д.). *Сложная неоднородная модель* отражает поведение сложной системы, в компонентах которой протекают процессы, относящиеся к разным классам. Например, при обработке металлов резанием протекают механические процессы деформирования и отделения стружки, процессы теплообразования, а также химические процессы окисления и диффузии.

Но есть и другой взгляд на классификацию математических моделей, в основе которого также лежит сложность моделируемой системы. В зависимости от места в иерархии описаний рассматривают математические модели, относящиеся к микро-, макро- и метауровням.

Микромодель отражает физические процессы, протекающие в непрерывном пространстве и времени. Типичные микромодели — дифференциальные уравнения в частных производных. С их помощью рассчитываются поля механических напряжений и деформаций, электрических потенциалов, температур, давлений и так далее обычно в однокомпонентных средах.

Макромодель отражает процессы, протекающие в системах, которые состоят из ряда функциональных компонентов. В ней непрерывной переменной является только время. В основе макромодели лежат компонентные модели (уравнения), которые связывают показатели входа и выхода (т. е. разные) отдельных компонентов системы и топологические модели, вид которых определяется отношениями (связями) между компонентами. Последние устанавливают связь между однородными показателями, но относящимися к разным компонентам системы. Большинство компонентных моделей уже получено в естественных и прикладных дисциплинах. Например, в гидравлике для дросселя имеется аналитическое выражение, связывающее показатели этого компонента системы, расход и давление.

Универсальными компонентными моделями являются обыкновенные дифференциальные уравнения, которые пригодны для анализа как динамических, так и установившихся состояний компонентов системы. Компонентные модели для установившихся режимов поведения (функционирования) можно также представить в виде системы алгебраических (трансцендентных) уравнений. Топологические модели большинства физических систем базируются на уравнениях равновесия или уравнениях непрерывности. Они строго справедливы для установившихся режимов, но их можно применять и в случаях, когда временем распространения возбуждения по линиям связи можно пренебречь. Под возбуждением понимается изменение какого-либо из показателей входа. Для электрической системы скорость распространения возбуждения равна скорости света, а для механической, гидравлической и пневматической — скорости звука в соответствующей среде.

Метамодель отражает функционирование систем, более сложных, чем системы, описываемые макромоделями. Чтобы это стало возможным, в метамоделях фигурируют только факторы, относящиеся к связям компонентов системы. Непрерывные величины представляются дискретными, что позволяет описывать функционирование объекта системой логических уравнений, отражающих процессы преобразования сигналов. Метамодели применяются также для описания процессов функционирования информационных и вычислительных систем, производственных участков, линий и цехов.

Имитационная модель — это особый вид математической модели, которая с приемлемой точностью отображает те стороны процесса функционирования сложной системы, которые представляют интерес с точки зрения поставленных целей.

Различаются *аналоговые* и *цифровые* имитационные модели. Аналоговой моделью называют систему, которая подчиняется тем же физическим законам, что и объект моделирования,

но проще и дешевле последнего, а также позволяет проще производить изменения параметров и измерения показателей. Аналоговая имитационная модель реализуется на аналоговой вычислительной машине (АВМ) при помощи соответствующего набора стандартных компонентов (сумматоров, интеграторов, усилителей и т. д.). После запуска этой модели на осциллографе отражается изменение параметров исследуемого процесса во времени.

Цифровое моделирование (на ЭВМ) обладает существенными преимуществами по сравнению с аналоговым. Имитирующая программа дает больше возможностей для регулирования показателей системы, позволяет просто моделировать случайные воздействия (с любым законом распределения), временные задержки и т. д. Таким образом, имитационная цифровая модель является чрезвычайно гибким инструментом, позволяющим воспроизвести любые, как реальные, так и «гипотетические» ситуации, так как на нее не распространяются никакие реальные ограничения. Кроме того, с ее помощью дешевле всего получить необходимую информацию о моделируемой системе.

Цифровая имитационная модель адекватна моделируемой системе если: 1) она вычисляет то, что подлежит измерению с заданной точностью; 2) логические элементы модели соответствуют логическим элементам моделируемой системы, а ее математический аппарат отображает функции, реализуемые системой; 3) вероятностные характеристики модели отражают характер случайных событий реальной системы.

Процессы в цифровой имитационной модели идут со скоростью, отличной от скорости их реализации в реальной системе. Поэтому введено понятие *модельное время*.

Процесс круглого врезного шлифования, схемно-расчетная модель которого показана на рисунке 1.6, а схема управления — на рисунке 1.13б, можно имитировать на ЭВМ, если разработать соответствующую программу, включающую модели производительности и тепловых ограничений. Результаты моделирования позволяют выяснить зависимость производительности от оставшегося припуска с учетом случайных погрешностей размеров заготовки, отработки команд систе-

мы управления скоростью поперечной подачи, а также вероятность брака по размерам и термическим повреждениям.

По способу получения различают *теоретические, эмпирические* и *комбинированные* математические модели. Теоретические модели получают методами формальной логики на основе очевидных исходных понятий и постулатов. При этом часто вводятся упрощающие допущения. Например, о существовании абсолютно твердого тела (в теоретической механике). Они отражают физические процессы, происходящие в компоненте технической системы. При этом параметры этих моделей имеют физический смысл.

Например, если фундамент машины совершает колебания согласно модели $x = a \sin(pt)$, где x — отклонение, a — амплитуда колебаний фундамента, p — частота колебаний фундамента, t — время, то измеренная вибрографом амплитуда колебаний A будет иметь значение в соответствии с теоретической моделью

$$A = a / [j / (mp^2) - 1],$$

где j — жесткость пружины, поддерживающей груз массой m . Последняя (аналитическая) модель получена решением соответствующего дифференциального уравнения. С ее помощью можно так выбирать показатели груза j и m , чтобы амплитуда колебания A была достаточной для наблюдения и измерения.

Другими примерами простых аналитических моделей, полученных теоретически, являются:

$$1. Q = 2\pi\lambda l (T_{c1} - T_{c2}) / \ln(r_2/r_1).$$

Эта модель отражает тепловой поток, передающийся через цилиндрическую стенку длиной l , наружным радиусом r_2 , внутренним радиусом r_1 и с коэффициентом теплопроводности λ .

$$2. A = \frac{P_a}{j \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \gamma^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}; \omega_0 = \sqrt{\frac{j}{m}}.$$

Эта модель отражает зависимость между амплитудой A вынужденных колебаний, вызванных периодической силой с ам-

плитудой P_a и частотой ω у одномассовой системы с массой m , жесткостью крепления j и коэффициентом демпфирования γ .

$$3. \sigma_r = \frac{3 + \mu}{8} \frac{\rho \omega^2 (r_2^2 - r^2)(r^2 - r_1^2)}{g r^2} + \frac{p_1^2 r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right);$$

$$\sigma_t = \frac{3 + \mu}{8} \frac{\rho \omega^2}{g} \left(r_2^2 + r_1^2 + \frac{r_1^2 r_2^2}{r^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} \right) + \frac{p_1 r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right).$$

Эти модели отражают зависимость напряженного состояния во вращающемся с частотой ω диске одинаковой толщины, насаженном на вал с натягом (внутреннее давление в отверстии равно p_1). Удельный вес материала диска равен ρ , коэффициент Пуассона равен μ , радиус отверстия равен r_1 , наружный радиус диска равен r_2 , $g = 9,81$ м/с². Радиальные σ_r и тангенциальные σ_t напряжения относятся к точкам диска, находящимся на расстоянии r от оси вращения.

Все вышеуказанные модели позволяют непосредственно анализировать состояние технической системы в зависимости от значений влияющих показателей.

Примером аналитической модели, не поддающейся непосредственному разрешению, является следующая теоретическая модель для определения времени t_2 , затраченного на выполнение чистового этапа круглого врезного шлифования (см. рис. 1.6).

$$4. t_2 = \left(\Pi_2 - (s_1 - s_2)(1 - \exp(-kt_2)) \right) / k / s_2,$$

где Π_2 — припуск, удаляемый на втором этапе рабочего цикла, s_1 и s_2 — подачи, соответственно на первом и втором этапах рабочего цикла, k — относительный коэффициент режущей способности. Так как значение t_2 входит и слева и справа в модель, то ее можно разрешить только численно методом итерации (повтора). Начальное значение t_2 будет $t_{20} = (\Pi_2 - (s_1 - s_2)/k)/s_2$; и далее $t_{2i} = (\Pi_2 - (s_1 - s_2)(1 - \exp(-kt_{2(i-1)})))/k/s_2$. Итерации продолжаются, пока $abs(t_{2i} - t_{2(i-1)}) < 0,05$; где abs — абсолютное значение.

Эмпирическая модель получается обработкой результатов экспериментов. При этом параметры эмпирической модели обычно не имеют физического смысла. Примерами таких аналитических моделей являются:

$$5. h_o = 4,05 - 4,7(v/100) - 0,325(v/100)^2 + 1,5(v/100)^3.$$

Эта модель отражает зависимость интенсивности радиально-го изнашивания резца h_o [мкм/м] от скорости резания v [м/мин] при постоянной подаче.

$$6. Ra = 0,1d^{0,26}v^{0,83}s^{-0,27};$$

эта модель отражает зависимость показателя шероховатости Ra [мкм] от диаметра отверстия d [мм], скорости резания v [м/мин] и подачи s [мм/об] при развертывании.

$$7. P_z = 3\,000as^{0,75}v^{-0,15}.$$

Эта модель отражает зависимость тангенциальной составляющей силы резания при продольном точении стальной заготовки резцом с пластиной из сплава марки Т15К6 от показателей режима: a — глубины резания [мм], s — подачи [мм/об], v — скорости резания [м/мин].

$$8. T = \left(\frac{350}{va^{0,15}s^{0,35}} \right)^{5,56}.$$

Эта модель отражает зависимость стойкости резца с пластиной из сплава марки Т15К6 от показателей режима точения стальной заготовки.

Комбинированной можно называть теоретическую модель, один или два показателя которой можно вычислить только при помощи соответствующей эмпирической модели. Примерами комбинированных моделей являются:

1. Теоретическая модель $h_w = \lambda Q^2 l / d^5$, которая отражает зависимость потери напора h_w [м] в трубе диаметром d [м] и длиной l [м] при расходе жидкости Q [м³/с]. В модель входит показатель λ (коэффициент шероховатости), который можно определить по эмпирической модели

$$\lambda = 0,11(\Delta_s/d + 0,534dv/Q)^{0,25},$$

где v — кинематический коэффициент вязкости, Δ_s — эффективная шероховатость внутри трубы, зависящая от технологии ее изготовления и уровня коррозии.

2. Теоретическая модель приведенной себестоимости C предварительной токарной обработки ступени вала диаметром d и длиной L при скорости резания v и подаче S имеет вид:

$$C = E \frac{\pi d L}{1000 s V} \left(1 + \frac{t_c + C_n / E}{T} \right) + E t_b,$$

где E — минутные затраты на эксплуатацию рабочего места; t_b — вспомогательное время (на вспомогательные переходы); t_c — время замены затупившегося инструмента; C_n — затраты на эксплуатацию инструмента за период его стойкости; T — стойкость инструмента, которую можно определить по приведенной ранее модели.

1.2.5. Управление техническими системами

Управлением называется процесс организации такого воздействия на систему или ее компоненты, в результате которого система функционирует в соответствии с ее назначением (или другими словами, выполняет заданную программу, достигает заданной цели), несмотря на изменение внешних условий и даже целей.

С точки зрения процесса управления выделенную систему можно разделить на две части: 1) *управляемая подсистема* (объект управления), 2) *подсистема управления* (субъект управления), которая *осуществляет управление при помощи выработанных ею управляющих воздействий на исполнительные элементы через соответствующие связи*. Объектами управления в технике являются технические системы, с помощью которых реализуются технологические, энергетические, транспортные, информационные и комбинированные процессы.

Алгоритм управления обусловлен алгоритмом функционирования объекта управления с учетом его статических и динамических свойств, а также ограничений. Цель управления тем или иным образом связывается с изменением во времени регулируемых (управляемых) выходных показателей объекта

управления. Поэтому необходимость в управлении возникает еще и потому, что вследствие влияния неконтролируемых и ненаблюдаемых факторов выходные показатели системы отклоняются от требуемых для выполнения ею своего служебного назначения.

Основой всякого управления является информация, циркулирующая в системе управления и в общем случае содержащая следующие качественно различные составляющие: 1) информацию о желаемом (заданном) состоянии объекта управления или командную информацию; 2) информацию о фактическом состоянии объекта управления; 3) информацию о значениях контролируемых возмущающих факторов; 4) информацию об изменении условий функционирования технической системы.

Носителями информации в электрических системах управления являются материальные факторы (сигналы) весьма низкого энергетического уровня, что очень удобно для хранения (сбора), передачи и преобразования (обработки) этих сигналов в системе управления. Однако конечный результат информационного процесса, то есть сигналы, непосредственно воздействующие на объект управления, должны обладать достаточной мощностью.

В механических и механогидравлических системах управления носителями информации являются кулачки и копиры.

Системы с управлением можно разбить на два класса: с разомкнутым и замкнутым управлением (рис. 1.25). Управляющая подсистема (УУ) первых не «знает» о результатах управления и функционирования объекта управления (ОУ). Алгоритм управления выполняется даже при выходе заданных значений показателей функционирования объекта управления за допустимые пределы. Во втором случае информация (сигналы) о результатах функционирования объекта управления по обратной связи передается подсистеме управления для «принятия решения» о соответствующем изменении управляющего воздействия.

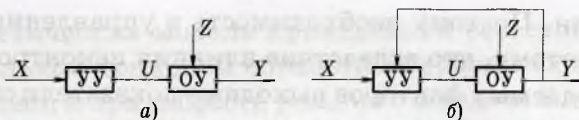


Рис. 1.25. Структурно-функциональные схемы управления классов:

a — разомкнутого; *б* — замкнутого

Примером системы с разомкнутым управлением является прутковый токарно-револьверный автомат, управляющая подсистема которого состоит из распределительного вала с кулачками, осуществляющими воздействия на исполнительные механизмы в порядке, который задан необходимым для достижения цели рабочим циклом. Управление и работа автомата будет продолжаться и при недопустимом износе инструментов (выпуск брака) или даже поломке одного из них.

Примером системы с замкнутой подсистемой управления является круглошлифовальный полуавтомат с системой «активного контроля», схема которого показана на рисунке 1.6. Измерительное устройство (ИУ) определяет значение оставшегося припуска (Π), подлежащего удалению. Эта информация в виде сигнала передается в счетно-логическое устройство (СЛУ), где в зависимости от значения припуска Π вырабатывается предписание (также в виде сигнала) исполнительному устройству об изменении скорости радиальной подачи (S), в соответствии с заданной программой. Из данного примера ясно, что в замкнутых подсистемах управления обязательно происходят процессы передачи, преобразования и выработки информации (сигналов).

Кроме *управления по отклонению* в системах с обратной связью имеет место *управление по возмущениям* за счет непосредственной компенсации возмущающих воздействий на входе. Примером такого управления является управление точностью обработки на токарном станке. Это управление компенсирует возмущающее воздействие погрешности заготовки на глубину резания и, следовательно, через изменение силы резания и упру-

гой деформации на стабильность размера обработанной поверхности. Измеряемым показателем в этом случае является сила резания. Компенсация осуществляется за счет соответствующего возмущению изменения подачи. Возможна комбинация двух методов управления — по отклонению и по возмущению.

Очевидно, что качество управления в системах с замкнутой подсистемой управления выше, чем с разомкнутой. В приведенном примере управления круглым шлифованием результаты управления не зависят от изменения радиуса и режущих свойств шлифовального круга в результате его износа. Однако в приведенном примере учитываются не все факторы, влияющие на точность шлифованной детали (износ и нагрев измерительных наконечников, инерционность приводов и т. д.).

Классификация подсистем управления производится и по ряду других признаков. Например, по степени участия человека (оператора) в управлении они делятся на следующие виды: *ручные, полуавтоматические и автоматические*. С точки зрения целей управления выделяют: 1) *стабилизацию состояния системы*; 2) *программное управление*, когда состояние системы должно изменяться во времени по некоторому заданному закону (программе); 3) *лебящее управление*, когда текущее состояние системы определяется за счет устранения рассогласования между управляющим воздействием и предшествующим состоянием; 4) *допусковое управление*, когда задача управления считается решенной, если фактическое состояние объекта управления отличается от заданного не более, чем на величину заданного допуска; 5) *адаптивное управление*, которое на основании анализа текущих характеристик объекта управления и окружающей среды соответствующим образом корректирует функционирование системы; 6) *оптимальное управление*, которое обеспечивает состояние объекта управления, наилучшее в смысле некоторого критерия, задаваемого заранее.

Управляемостью системы будем называть вероятность достижения задаваемых целей в различных ситуациях, ха-

рактизуемых набором уровней входных факторов и управляющих воздействий. Чтобы повысить управляемость, применяют адаптивные (самонастраивающиеся, самоприспосабливающиеся) системы управления, у которых автоматически изменяется алгоритм и (или) интенсивность управляющего воздействия с целью наилучшего (в каком-то смысле) управления объектом.

1.2.6. Жизненный цикл и эволюция технических систем

Любой технический объект (поколение систем с одинаковыми или близкими функциями) с течением времени физически и морально устаревает и заменяется новым, более совершенным. Так, металлорежущие станки, рассчитанные на работу с инструментом из быстрорежущей стали, после внедрения резцов с пластинками из металлокерамики оказались в техническом смысле устаревшими, поскольку их мощность, частота вращения и прочность (жесткость) не обеспечивали использование эксплуатационных возможностей нового инструмента. То есть произошел не физический, а моральный износ.

При эксплуатации технической системы годовые эксплуатационные затраты с течением времени увеличиваются из-за необходимости в ремонтно-восстановительных работах, замены изношенных частей, более частых регулировок и наладок (рис. 1.26, кривая 2). С течением времени разность между годовой прибылью (рис. 1.26, кривая 1) и годовыми эксплуатационными затратами уменьшается и с критического момента $T_{кр}$ эксплуатация технической системы становится убыточной. Чем выше качество изготовления технической системы, тем медленнее увеличиваются эксплуатационные затраты и позднее наступает ее физический износ.

С точки зрения морального износа любая техническая система проходит определенный жизненный цикл, состоящий из последовательности следующих этапов.

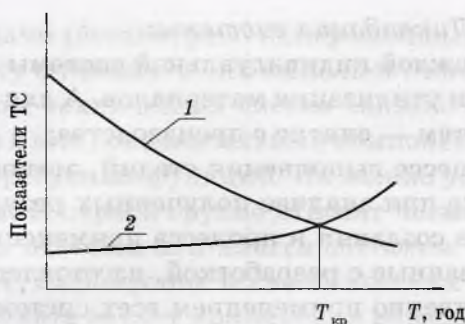


Рис. 1.26. Цикл жизни оборудования в сфере эксплуатации:

1 — прибыль; 2 — эксплуатационные затраты

Этап 1 — Процесс создания:

1.1) возникновение потребности. Формулирование и оценка актуальности проблемы. Рождение замысла системы;

1.2) технико-экономический анализ ситуации. Оценка требуемых и наличных ресурсов. Принятие решения о необходимости проектирования;

1.3) разработка технического задания (ТЗ), либо его проекта, где в первую очередь указывают потребительские свойства новой системы, определяющие ее потребительскую ценность;

1.4) проектирование технической системы, которое подразделяется на разработку: технического предложения, эскизного проекта, технического проекта и рабочей документации;

1.5) изготовление и испытание опытного образца (опытной серии);

1.6) коррекция результатов проектирования;

1.7) серийное (массовое) производство систем.

Этап 2 — Процесс применения:

2.1) поставка (продажа) и монтаж технических систем;

2.2) эксплуатация технических систем, которая состоит в их применении, обслуживании и обеспечении, а также в утилизации отходов их функционирования. Время эксплуатации можно условно разделить на два периода: экономически полноценной эксплуатации и морального старения.

Этап 3 — Ликвидация системы:

3.1) для каждой индивидуальной системы это демонтаж, уничтожение и утилизация материалов. А для множества однотипных систем — снятие с производства;

3.2) в процессе выполнения стадий, этапов и отдельных работ, а также при анализе полученных результатов участники процесса создания и процесса применения принимают решения, связанные с разработкой, изготовлением, эксплуатацией и собственно применением всех систем данного типа и каждого экземпляра в отдельности.

На всех этапах жизненного цикла технических систем необходимы затраты материальных и финансовых ресурсов и только при их продаже и использовании возможно получение прибыли, которая обязательно должна превысить затраты.

Возрастание требований к уровню качества выполнения функций технических систем вызывает потребность их совершенствования. Это совершенствование (эволюция) осуществляется путем конкурентного отбора улучшенных в соответствии с поставленной целью вновь спроектированных и испытанных практикой эксплуатации (новых поколений) технических систем. *Эволюция технических систем есть сложный диалектический процесс, в котором сочетаются одновременно две противоположные тенденции: свертывание подсистем и систем, с одной стороны, и их усложнение — с другой. Суть свертывания — уменьшение количества компонентов в системе за счет передачи функций удаляемого компонента другим компонентам системы.*

Компонент технической системы можно удалить, если: а) нет объекта его функции; б) функцию удаляемого компонента выполняет сам объект функции; в) функцию удаляемого компонента выполняют оставшиеся компоненты технической системы. Свёртывание обычно начинается с компонентов, выполняющих функции самого низкого ранга. Примером свертывания являются станки, у которых отсутствуют традиционные компоненты, энергетически обеспечивающие

движение подачи (бесцентрово-шлифовальные, гайконарезные и т. д.). Эту функцию в них выполняет инструмент.

Усложнение технических систем связано с необходимостью введения в них дополнительных компонентов для реализации новых требуемых функций. Их можно условно разбить на три группы. К первой группе относят *новые подсистемы для обработки объекта или класса объектов функции*.

Пример 1.1. Расширение технологических возможностей токарного автомата за счет применения навесных фрезерных и сверлильных (в поперечном направлении) приспособлений.

Пример 1.2. В универсальные наборы отверток вводят несколько лезвий для завинчивания шурупов и винтов, а также шило, маленький буравчик и т. д.

Пример 1.3. Пылесос может не только всасывать воздух с пылью, но еще и нагнетать. Этот ресурс используется для создания к пылесосу таких приспособлений, которые реализуют функции разбрызгивателя, насоса и пр. Другой ресурс пылесоса — его объем используют при изготовлении пылесосов-пуфиков: в свободное от уборки время (при хранении) пылесос используется как сиденье.

Ко второй группе относят *подсистемы обслуживания самой технической системы на разных этапах ее жизненного цикла* (что нужно делать с самой системой для поддержания ее работоспособности, хранения, перевозки и т. д.).

Пример 2.1. Для транспортировки хрупких систем изготавливают специальную тару.

Пример 2.2. Тяжелые механизмы, как правило, имеют устройства для облегчения транспортировки: рымболты, специальные «лапы» и т. д.

Пример 2.3. Для уменьшения занимаемой площади при хранении и перевозке велосипеда делают складными.

К третьей группе относят *подсистемы для операций, выполняемых в надсистеме* (что должна делать техническая система для функционирования в условиях окружающей среды, для использования ее ресурсов, реализации некоторых ее функций, обеспечения безопасности и экологичности).

Пример 3.1. Металлорежущие станки имеют предохранительные экраны для защиты оператора от отлетающей стружки и капель СОЖ.

Пример 3.2. Автомобильные компании разрабатывают концепцию полного жизненного цикла автомобиля, при котором заранее в конструкцию закладывают технические решения, облегчающие его утилизацию и обеспечивающие возможность использования образующегося сырья в новом цикле производства. Это повышает экологичность системы.

Причиной введения новых функций и, соответственно, новых компонентов может быть исчерпание возможностей человека по условиям выполнения каких-то функций (например, безопасности, точности, скорости реакции и т. д.).

В технических системах с одинаковой функцией переход от поколения к поколению обусловлен устранением выявленного главного недостатка (недостатков) и происходит при наличии необходимого научно-технического уровня и социально-экономической целесообразности следующими наиболее вероятными путями иерархического исчерпания возможностей:

а) при неизменном физическом принципе действия и техническом решении улучшаются показатели качества технической системы: за счет повышения качества изготовления и сборки, за счет применения более качественных материалов, за счет улучшения формы ее компонентов;

б) при исчерпании возможностей цикла «а» происходит переход к более рациональному техническому решению (конфигурации), после чего развитие опять идет по циклу «а» (циклы «а» и «б» повторяются до исчерпания возможностей данного физического принципа действия);

в) после исчерпания возможностей циклов «а» и «б» происходит революционный переход к более рациональному физическому принципу действия, после чего развитие опять идет по циклам «а» и «б» до тех пор, пока показатели качества технической системы опять не приблизятся к глобальному экстремуму их значения.

При неизменном принципе действия в результате реализации циклов *a* и *b* критерий развития K_{pa} (главный характерный показатель) увеличивается в соответствии с *S*-функцией (рис. 1.27). При реализации более прогрессивного принципа действия развитие характеризуется другой (сдвинутой вправо и более высокой) *S*-функцией. Критерий развития — показатель наиболее важный для характеристики качества выполнения технической системы главной полезной функции. Например, скорость самолета, производительность бумагоделательной машины.

В каждом случае перехода от поколения к поколению технических систем происходят изменения, корреляционно связанные с характером недостатков предшествующего поколения. *Из всех возможных изменений конфигурации реализуется в первую очередь то, которое дает необходимое или существенное устранение недостатков при минимальных интеллектуальных и производственных затратах.*

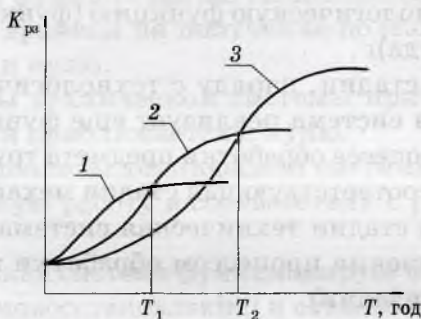


Рис. 1.27. Изменение критерия развития при неизменном принципе действия:

1, 2, 3 — смена физических принципов действия;

K_{pa} — критерий развития

Понятие «научно-технический уровень» включает используемые технологические машины и методы, источники энергии, материалы, информацию о физико-технических эффектах, которые используются или могут быть использованы

в технике. *Социально-экономическая целесообразность* создания и использования технической системы указывает на то, что, во-первых, изготовление и практическое использование технической системы экономически выгодно, а во-вторых, не наносит вреда окружающей среде не только на этапах использования, но и ликвидации.

При определенных условиях может произойти скачок к новому техническому решению или принципу действия без исчерпания возможностей предыдущего технического решения или принципа действия. Что существенно ускоряет развитие техники.

Технические системы с функцией обработки предмета труда имеют три стадии развития, связанные с последовательной реализацией с помощью технических средств трех фундаментальных функций и последовательным исключением участия человека в технологическом процессе:

- на первой стадии развития техническая система реализует только технологическую функцию (функцию переработки предмета труда);
- на второй стадии, наряду с технологической функцией, техническая система реализует еще функцию обеспечения энергией процесса обработки предмета труда (энергетическая функция, соответствующая стадии механизации труда);
- на третьей стадии техническая система реализует еще функцию управления процессом обработки предмета труда (стадия автоматизации).

Переход к каждой очередной стадии происходит при исчерпании природных возможностей человека в улучшении качества выполнения соответствующих функций, а также при наличии необходимого научно-технического уровня и социально-экономической целесообразности. Следует отметить, что техника, которая появляется в настоящее время, почти всегда реализует и технологическую, и энергетическую функции, а во многих случаях (частично или полностью) и функцию управления.

Эволюция технических систем часто осуществляется в направлении приближения к «идеальному техническому решению». При этом все использованные технические решения (S_{ij}) можно разбить на две группы: прогрессивные, которые лежат на главной магистрали развития, и тупиковые, которые после испытания практикой эксплуатации были отброшены как недостаточно эффективные (рис. 1.28). Будем считать техническое решение идеальным, если оно обеспечивает спроектированной технической системе одно или несколько из следующих свойств:

— Размеры технической системы приближаются к размерам обрабатываемого или транспортируемого объекта, а чистая масса системы намного меньше массы обрабатываемого или транспортируемого объекта.

— Масса и размеры функциональных компонентов технической системы приближаются к нулю, а в пределе становятся равными нулю (когда функционального компонента нет, но необходимая функция все же выполняется).

— Затраты времени на получение полезного результата приближаются к нулю.

КПД работы технической системы приближается к 1, а расход энергии приближается к нулю.

— Все компоненты технической системы все время выполняют полезную работу в соответствии с расчетными возможностями.

— Техническая система функционирует бесконечно долго без ремонта (самовосстановление) и остановок.

— Техническая система функционирует без человека или с минимальным его участием.

— Техническая система и ее отходы не оказывает отрицательного воздействия на человека и окружающую природную среду.

Понятие идеальности, несмотря на свою фантастичность, часто позволяет создать ориентир для выбора прототипа и поиска нового улучшенного технического решения, не являющегося тупиковым (на рис. 1.28 это отображено как умень-

шение угла поиска, то есть β вместо α). Однако идеальное техническое решение направляет поиск только к техническому идеалу, без учета интересов потребителей (удобство использования, управления и обслуживания, безопасность и экологичность), интересов изготовителей (технологичность конструкции, неиспользование дорогих или труднодоступных материалов и комплектующих), интересов транспортников и продавцов (удобство перевозок, складирования и хранения) не имеет шансов на практическое использование. Следовательно, при поиске наилучшего технического решения нужно учитывать интересы всех слоев общества.

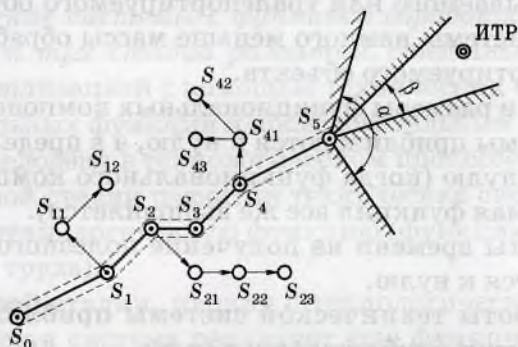


Рис. 1.28. Схема эволюции технической системы

При наличии необходимого научно-технического потенциала и социально-экономической целесообразности *возникшая новая потребность удовлетворяется с помощью впервые созданных технических систем*; при этом возникает новая функция, которая затем существует как угодно долго, пока ее реализация будет обеспечивать улучшение жизни людей. Число таких качественно и количественно отличающихся потребностей-функций, относящихся к техносфере страны (или мира), со временем возрастает по экспоненциальному закону.

Ниже рассмотрен пример эволюции технических систем, относящихся к металлорежущим станкам. С начала XX-го века в основном использовались универсальные станки с руч-

ным управлением, ориентированные на обработку определенных групп поверхностей с использованием определенных типов инструмента (токарные, строгальные, фрезерные, расточные, шлифовальные и т. д.). Производство, оснащенное такими станками, отличалось высокой живучестью (выход из строя нескольких станков предприятия не приводит к прекращению его работы, только несколько снижается общая производительность) и гибкостью (универсальный станок можно легко переналадить для обработки разных деталей, правда одного класса).

Необходимость повышения производительности и качества обработки потребовала повышения скорости и точности выполнения рабочих движений вновь проектируемых станков, а также к существенному повышению их жесткости. С другой стороны, требовалась передача функции управления станком от человека системе управления. Вначале использовались механические (кулачковые) системы управления (например, на токарных автоматах и полуавтоматах), применение которых существенно снижало гибкость станка. Переход на электрические и затем на электронные системы управления позволил вернуть полуавтоматическим станкам былую гибкость.

Обработка на металлорежущих станках протекает при непрерывном изменении внешних условий (колебания глубины удаляемого слоя и твердости заготовки) и параметров динамической системы станка (изменение сил трения в направляющих и жесткости технологической системы). В этих условиях наличие жесткой программы, рассчитанной на наихудшие условия обработки, зачастую ведет к снижению производительности. Стремление преодолеть эти недостатки привело к появлению систем управления, которые позволяют оптимизировать процесс обработки каждой детали благодаря использованию текущей информации по показателям, определяющим условия и качество процесса резания. Эту информацию получают с помощью датчиков обратной связи в ходе резания. Такое управление было названо *адаптивным*.

С целью повышения производительности для массового производства разрабатывались и применялись станки для комплексной (разнообразной) обработки деталей с совмещением во времени рабочих и вспомогательных переходов (агрегатные станки). Для этих же целей применялись автоматические линии станков с автоматической передачей заготовок. Но такие станки и станочные системы неприменимы в серийном производстве из-за отсутствия их гибкости.

Поэтому для серийного и мелкосерийного производства создавались многоцелевые перенастраиваемые станки с числовым программным управлением (ЧПУ), которые позволяли проводить комплексную (правда, последовательную) обработку разных деталей. Технологические возможности таких станков расширяются благодаря агрегатно-модульному принципу построения, что позволяет совместить, например, на токарных многоцелевых станках токарную фрезерную и шлифовальную обработку. Кроме того, многоцелевые станки снабжаются системами управления с новыми функциями: 1) коррекция траектории при отклонении радиуса инструмента от заданного; 2) определение и учет погрешностей установки заготовки.

В результате освоения режущего инструмента на основе мелкозернистого твердого сплава с износостойкими покрытиями, керамики, кубического нитрида бора и алмаза стало возможным высокоскоростное резание (до 2 000 м/мин). Поэтому потребовались станки с высокоскоростными шпиндельными узлами (частота вращения до 100 000 об/мин), с улучшенными динамическими характеристиками. Потребовались устройства для эффективного отвода значительного объема образующейся стружки.

Одним из главных направлений развития станкостроения является дальнейший поиск конструктивных решений *сверхточных станков*, которые должны обеспечивать погрешность обработки в пределах 0,01...0,1 мкм и показатель шероховатости Ra в пределах 0,002...0,01 мкм.

В последнее время получили распространение *механотронные системы*. Сюда относят как использование так называемого прямого привода, так и создание станков принципиально новых концепций (например, *гексаподов*). Гексапод позволяет перемещать исполнительный орган (инструмент) по вертикали и горизонтали, а также поворачивать в трех плоскостях.

В соответствии с эволюцией металлорежущих станков изменились требования к основным и вспомогательным рабочим. Если сначала для работы на станках с ручным управлением требовались основные рабочие достаточно высокой квалификации (4-й–6-й разряды), то при автоматизации управления требования к квалификации основных рабочих снижаются, но повышаются требования к квалификации вспомогательных рабочих (наладчиков).

Знание истории развития технических систем с определенными (схожими) функциями часто подсказывает удачные идеи их дальнейшего совершенствования (так как развитие идет по спирали, то прошлые решения на новом уровне часто дают дополнительный полезный эффект). Анализ эволюции технических систем с учетом моды, рынка, психологии проектировщиков и пользователей позволяет выявить и кратко описать опыт решения задач инженерного творчества, который часто оформляют в виде обобщенных эвристических приемов (правил), подсказывающих способ получения улучшающего технического решения.

1.3. Особенности моделирования производственных систем (ПС)

1.3.1. Общие положения, цели и задачи моделирования

Модель ПС — это упрощенный аналог объекта-оригинала, подобный ему по некоторым свойствам. Любая модель гомоморфна, то есть отражает только определенные аспекты,

учитывает только часть факторов и определяет только некоторые свойства объекта. Полного подобия модели и объекта быть не может, иначе это уже не модель, а сам объект.

Модель считается *адекватной* объекту по определенным свойствам, если эти свойства для модели и объекта совпадают. Любая модель *не единственно возможная* для данного объекта и свойств.

Почти всегда модель *субъективна*, то есть несет в себе печать индивидуальности исследователя.

Моделирование ПС — это любое описание или воспроизведение свойств, структуры или работы объекта с помощью его аналога. Понятие «моделировать» может использоваться в трех значениях:

- создавать модель объекта (разрабатывать);
- экспериментировать с моделью для исследования свойств самой модели (проверять);
- ставить эксперименты на модели для исследования объекта (использовать).

В качестве объекта моделирования можно рассматривать систему, которая, как известно, является целостным множеством взаимосвязанных элементов.

Признаки (свойства) любой системы:

1. Наличие элементов.
2. Наличие связей между элементами.
3. Целостность — свойство выделяться из окружающей среды, как нечто единое с точки зрения цели функционирования или существования.
4. Наличие связей с окружающей средой (надсистемой).
5. Наличие истории.

Моделирование особенно актуально для систем, относящихся к категории «сложные», к которым принадлежат и большинство ПС.

Дополнительные признаки (свойства) систем категории «сложные»:

1. Большая размерность — элементов и связей много.
2. Многогранность — связи разнородные, много аспектов, факторов и параметров.

3. **Связность** — изъятие любой части (элемента или подсистемы) влечет изменение свойств системы в целом.

4. **Целенаправленность** — подчинение локальных целей (оптимумов) элементов глобальной цели (оптимуму) всей системы, хотя они, как правило, не совпадают.

5. **Эмерджентность** — свойства системы не сводятся к сумме свойств ее элементов, то есть на уровне системы возникает новое качество.

6. **Развитие во времени** — изменчивость, но устойчивость (гомеостазис).

7. **Неопределенность** — наличие случайных событий и величин.

8. **Организационность** — часть функций выполняется людьми (человеческий фактор).

Необходимость моделирования сложных систем, включая ПС, обусловлена следующим:

1. *Сложность* системы такова, что представить результаты ее функционирования умозрительно или определить простыми расчетами невозможно.

2. *Отсутствие* системы на стадии создания или недоступность ее аналогов делают невозможным натуральный эксперимент.

3. *Большая стоимость* системы, даже если она уже есть, делают эксперимент и метод «проб и ошибок» неприемлемым.

4. *Уникальность* каждой сложной системы делает чужой или собственный предыдущий опыт малопригодным.

Цель моделирования — сформировать суждение об объекте, не прибегая к нему. *Функции моделей*:

1. Осмысление (описание и упорядочивание собственных или экспертных знаний).

2. Общение (сжато и однозначно что-то показать, увидеть вместо услышать).

3. Обучение и тренаж (ситуативные деловые игры, тренажеры).

4. Прогнозирование (представление поведения и характеристик).

5. Экспериментирование (обыгрывание для выбора и оптимизации).

Типы моделей по назначению:

1. **Описательные** — систематизируют известную информацию.

2. **Прогнозирующие** (представляющие, предписывающие) — сами «добывают» информацию пробой, расчетом или воспроизведением.

3. **Оптимизационные** — ищут лучший вариант сочетания доступной информации.

В этом случае модели нижеследующих типов обычно являются одновременно и моделями предыдущих типов, но не наоборот.

Задачи моделей на этапе проектирования и эксплуатации ПС:

1. Оценка эффективности заданного варианта структуры и параметров (прямая задача) или определение требований к варианту для обеспечения заданной эффективности (обратная задача).

2. Оценка вероятности выполнения планового задания.

3. Оценка стратегий и алгоритмов организации, планирования, диспетчирования и управления.

1.3.2. Классификация производственных моделей

Главным классификационным признаком моделей по определению должен быть признан вид подобия модели и объекта. Однако, видов подобия может быть бесчисленное множество, поэтому предложить всеобъемлющую и в то же время обозримую классификацию по этому признаку не представляется возможным.

По этой причине в основу первичной классификации моделей чаще всего закладывают другой признак, а именно — «способ представления объекта». Это объясняется тем, что каждому виду подобия свойственен один или несколько способов представления объекта. Эти способы в определенной мере отражают и само подобие. Но в отличие от последнего, они повторяются, их количество ограничено, и они хорошо поддаются группированию. Это и используется для классификации, представленной на рисунке 1.29.

Приведенная классификация достаточно условна и не всегда однозначна. Конкретная модель — это чаще всего комбинация или последовательная трансформация моделей различного вида. Соотношение точности и абстрактности (общности, универсальности) основных видов моделей представлено на рисунке 1.30.

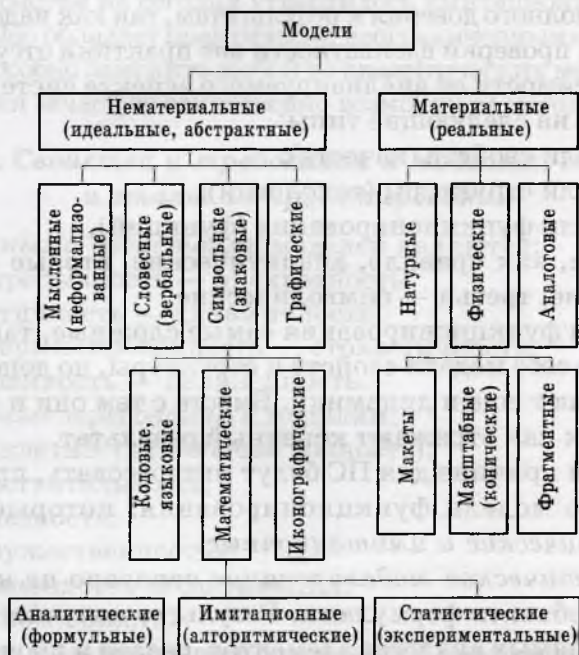


Рис. 1.29. Классификация видов моделей

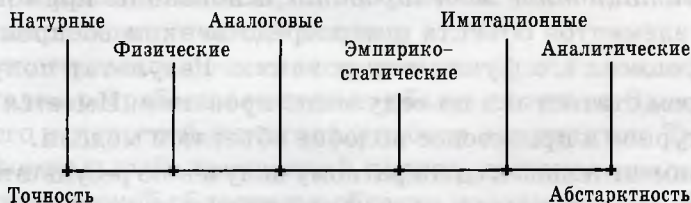


Рис. 1.30. Точность и абстрактность моделей различных видов

Основным видом моделирования систем является математическое моделирование, так как оно самое доступное, универсальное

ное, малотрудоемкое и экономичное. Сдерживающими факторами применения математического моделирования можно считать:

- часто не хватает объективных знаний об объекте;
- даже то, что знаем, мы не всегда умеем формализовать;
- требуется специальная математическая подготовка;
- нет полного доверия к результатам, так как надежные методы проверки адекватности вне практики отсутствуют.

В зависимости от анализируемого аспекта системы, модели делятся на следующие типы:

- модели свойств (качеств);
- модели структуры (топологии);
- модели функционирования (функций).

Первые, как правило, аналитические, вторые — иконографические, третьи — символические.

Модели функционирования самые сложные, так как уже содержат в себе модели свойств и структуры, но дополнительно учитывают еще и динамику. Вместе с тем они и самые полезные, так как отражают конечный результат.

По этой причине для ПС будут интересовать, прежде всего, именно модели функционирования, которые делятся на *аналитические и имитационные*.

Аналитическое моделирование основано на косвенном описании объекта формулами. Результат получается вычислением. Прямых аналогов элементов, связей и процессов объекта в модели нет.

Имитационное моделирование основано на прямом описании элементов объекта и непосредственном воспроизведении процесса его функционирования. Результат получается сбором статистики по ходу моделирования. Имеется явное структурное и процессное подобие объекта и модели.

Применительно к однократному получению результатов при помощи аналитической модели применяют термин «просчет», при помощи имитационной — «прогон». Имитационное моделирование в общем случае более точное, детальное и информативное, аналитическое — менее трудоемкое, с большей наглядностью зависимостей и лучшей приспособленностью для оптимизации.

Аналитические модели обычно применяют на ранних стадиях анализа и проектирования систем для сужения области поиска, а имитационные — на завершающих стадиях для выбора или уточнения окончательного варианта.

В качестве основного метода математического моделирования сложных систем на сегодня утвердилось имитационное моделирование. Оно обладает практически неограниченными возможностями, способно заменить любой из аналитических методов, а само является зачастую единственно возможным методом.

1.3.3. Свойства и требования к моделям, стадии и этапы их проектирования

Основными свойствами моделей являются:

- непрерывность — дискретность;
- статичность — динамичность;
- детерминированность — стохастичность;
- линейность — нелинейность.

Основные требования к моделям:

- адекватность (включая точность);
- чувствительность;
- полезность;
- «дружественность»;
- возможность модификации;
- экономичность.

Стадии моделирования совпадают с перечнем компонентов понятия «моделировать», а именно:

- разработка модели;
- исследование самой модели;
- экспериментирование на модели для исследования объекта.

Стадия разработки модели наиболее сложная. Здесь больше всего неясностей, неопределенности и вариантов. Требуется неформальный, творческий подход, высокая квалификация в предметной области и в области моделирования. Вторая и третья стадии проще. Модель уже имеется, и манипуляции с ней — это уже «дело техники». Здесь вступают в силу универсальные математические методы, хорошо отработанные методики и готовые программные средства.

По этой причине для ПС интересуют, прежде всего, стадии именно разработки модели. Этапы на стадиях разработки и исследования моделей представлены на рисунке 1.31. Этапы и схема для машинного моделирования представлены в таблице 1.5 и на рисунке 1.32.



Рис. 1.31. Этапы проектирования

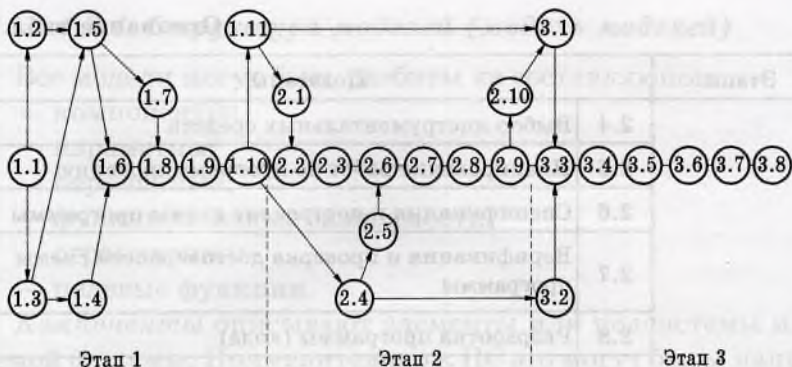


Рис. 1.32. Сетевой график этапов машинного моделирования

Таблица 1.5

Этапы машинного моделирования

Этапы	Подэтапы	
1. Построение концептуальной модели и её формализация	1.1	Постановка задачи моделирования
	1.2	Анализ задачи
	1.3	Определение требований к исходной информации об объекте и её сбор
	1.4	Выдвижение гипотез и принятие допущений
	1.5	Определение параметров и переменных
	1.6	Установление основного содержания модели
	1.7	Обоснование критериев эффективности системы
	1.8	Определение процедур аппроксимации (выбор способа и законов представления величин)
	1.9	Описание концептуальной модели
	1.10	Проверка достоверности концептуальной модели
	1.11	Оформление и согласование документации по первому этапу
2. Алгоритмизация и программная реализация	2.1	Построение логической схемы модели
	2.2	Получение математических соотношений
	2.3	Проверка достоверности логической схемы модели

Этапы	Подэтапы	
	2.4	Выбор инструментальных средств
	2.5	Планирование работ по программированию
	2.6	Спецификация и построение схемы программы
	2.7	Верификация и проверка достоверности схемы программы
	2.8	Разработка программы (кода)
	2.9	Проверка достоверности программы
	2.10	Оформление документации по второму этапу
3. Получение и интерпретация результатов	3.1	Планирование эксперимента с моделью
	3.2	Определение требований к вычислительным средствам
	3.3	Проведение рабочих расчетов (прогонов)
	3.4	Анализ результатов
	3.5	Выбор формы представления результатов для заказчика
	3.6	Интерпретация результатов
	3.7	Выводы и рекомендации для системы
	3.8	Оформление документации по третьему этапу

Возможные этапы на стадии экспериментирования с моделью:

1) планирование и осуществление модельного эксперимента;

2) подбор вида и параметров аппроксимирующих зависимостей (регрессионный анализ);

3) проверка корректности принятых зависимостей (корреляционный анализ);

4) «свертка» частных критериев эффективности в один с последующим решением полученной однокритериальной задачи классическими методами оптимизации.

1.3.4. Структура моделей (модель моделей)

Все модели могут быть разбиты на составляющие:

- компоненты;
- параметры;
- переменные;
- функциональные зависимости;
- ограничения;
- целевые функции.

Компоненты описывают элементы или подсистемы изучаемой системы. Применительно к ПС это могут быть, например, обрабатывающая, транспортно-накопительная и прочие подсистемы.

Параметры — это постоянные для данной модели величины, которые устанавливаются исследователем. Константы могут рассматриваться, как частный случай параметров, когда они постоянны, но не могут быть выбраны исследователем.

Переменные делятся на независимые (экзогенные, входные, варьируемые, внешние) и зависимые (эндогенные, внутренние). Зависимые переменные, в свою очередь, подразделяются на переменные *состояния* и *выходные* переменные.

Функциональные зависимости (ФЗ) описывают связь (преобразование) независимых переменных и параметров с зависимыми. В качестве ФЗ могут выступать функции, логические условия, алгоритмы, таблицы, словесные описания.

Ограничения — это диапазоны возможных значений переменных и параметров.

Целевая функция (функция критерия) — это точное отображение цели системы и правила оценки ее достижения или приближения к ней. Целью может быть улучшение или сохранение чего-либо.

В символическом виде вышесказанное можно представить следующим образом:

$$y_j = f(x_i, a_k, e_m), x \in X, y \in Y, a \in A,$$

где y — зависимые переменные (выходы);

- x — независимые переменные (входы);
- a — параметры;
- e — возмущения;
- X — ограничения на x (область существования);
- Y — ограничения на y (критериальное пространство);
- A — ограничения на a (область параметров);
- f — функциональная зависимость (целевая функция).

Переменные и параметры могут быть как управляемыми, так и неуправляемыми.

Структуру модели функционирования системы можно представить схемой рисунка 1.33 и следующим выражением:

$$Y(t) = F(X, Z, A, E, U, t),$$

где Y — вектор выходных характеристик, например, выработка, производительность, загрузка и пр.;

X — вектор входных воздействий (контролируемых, но не управляемых), например, поступление заказов;

Z — вектор собственных внутренних воздействий (контролируемых, управляемых и неуправляемых), например, осуществление зависимых переходов или возникновение отказов;

A — вектор внутренних параметров (контролируемых и выбираемых, но в рамках одного просчета или прогона уже неизменных), например, фиксированное количество станков, транспортных средств, спутников и пр.;

E — вектор возмущающих воздействий внешней среды (неуправляемых, часто и неконтролируемых), например, колебания качества заготовок, вызывающие изменение доли брака;

U — вектор управляющих воздействий (контролируемых и управляемых), например, выбор по динамическим приоритетам при диспетчировании;

t — время;

F — ФЗ, иногда называется законом функционирования системы.

Все элементы из E стохастические, из Z — многие, из X — некоторые.

Иногда модель удобно описать, применив кодовую запись использующихся в ней данных. В этом случае структуру модели можно представить следующим множеством, говорят *кортежем* или *тройкой* по числу элементов:

$$M = (\text{ИД}, \text{ВД}, \text{ФЗ}),$$

где ИД = {ФИД, ВИД} — исходные данные фиксированные (заданные, неуправляемые) и варьируемые (управляемые);

ВД = {ПФ, ПЭ} — выходные данные в виде показателей функционирования объекта и показателей эффективности;

ФЗ: ИД → ВД — функциональные зависимости, связывающие ИД и ВД.

1.3.5. Адекватность моделей

Как уже говорилось, модель считается *адекватной* объекту по определенным свойствам, если эти свойства для модели и объекта совпадают. Другими словами, *адекватность* — это степень уверенности, что результаты и выводы, полученные на модели, будут такими же, как при натурном эксперименте или при наблюдении за реальным объектом.

Адекватность является важнейшим из требований к модели. Нет адекватности, и всё остальное уже не имеет значения — модель бесполезна или даже вредна, так как может повлечь принятие ошибочных решений. Она всегда относительна. Говорить об адекватности вообще, не оговаривая аспекты сравнения, некорректно. Модель адекватная для одной цели, может быть совершенно неадекватной для другой.

Несмотря на интуитивно понятный смысл термина «адекватность», его толкование до сих пор вызывает разногласия, порой принципиальные. Например, адекватность часто отождествляется с одним из ее компонентов — с точностью. При этом

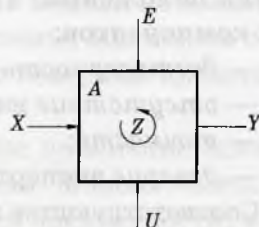


Рис. 1.33. Структура модели функционирования системы

непонятно, то ли точность трактуется расширенно, то ли адекватность ограничено. Есть мнение, что адекватность — это отражение объекта с определенной степенью приближения на уровне понимания объекта разработчиком. А что, если это субъективное понимание уже изначально неправильное?

В связи с адекватностью, в литературе встречаются самые разные термины. Вот только некоторые из них: достоверность, обоснованность, погрешность, истинность, корректность, степень приближения, реалистичность, объективность, чувствительность, степень изоморфизма, правильность, надежность, степень доверия. Часто можно встретить даже выражение просто «хорошая модель». Чтобы избежать путаницы, в дальнейшем мы будем придерживаться положения, что адекватность есть совокупность таких компонентов:

- *достоверность* (внешняя адекватность);
- *отсутствие* внутренних ошибок;
- *точность*;
- *доверие* экспертов и пользователей.

Соответствующие этим компонентам виды проверок адекватности представлены на рисунке 1.34.

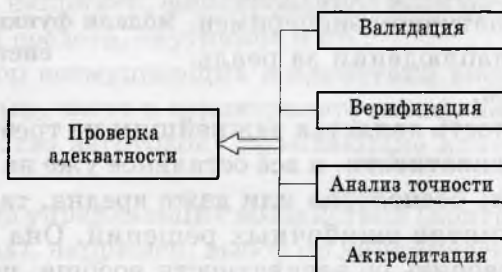


Рис. 1.34. Виды проверки адекватности моделей

Валидация — это проверка, соответствует ли концептуальная модель реальной системе для рассматриваемого аспекта и задачи. Другими словами — это проверка соответствия задуманного действительности, то есть:

- правильности нашего представления об объекте;
- присутствия в модели всех значимых факторов;
- приемлемости сделанных упрощений;
- справедливости принятых допущений;
- достоверности исходных данных.

Верификация — это проверка, соответствует ли программная реализация концептуальной модели. Другими словами — это проверка соответствия реализации задуманному.

Анализ точности (проблемный анализ, валидация данных) — это проверка, соответствует ли разброс результатов модели допустимому диапазону. Другими словами — это проверка преобразований информации от входа к выходу модели. В такой трактовке точность выступает, как внутреннее свойство самой модели, и результаты точной модели не обязательно будут совпадать с результатами системы. Мы можем очень точно моделировать наши совершенно неверные представления об объекте.

Аккредитация — это официальное признание заказчиком правильности и пригодности модели. Можно отметить, что абсолютно надежных методов проверки адекватности, а точнее ее главной составляющей — достоверности, не существует. Проблема заключается, прежде всего, в оценке. Вернемся к приведенному в начале раздела определению адекватности. Сразу возникает ряд вопросов. Как однозначно оценить общую адекватность модели, если интересующих свойств несколько, их значимость неодинакова, а степень несовпадения модельных и объектных значений у них различна. Какой уровень несовпадения считать допустимым? Как численно оценить несовпадение по отдельному свойству, если оно качественное и вдобавок не бинарное? Какое заключение принять за окончательное, если используются мнения экспертов и они расходятся? И главный вопрос: известны ли нам вообще истинные значения свойств объекта, которые должны выступать базой сравнения? Самого объекта может еще и не быть, выборка натурального эксперимента или наблюдения всег-

да ограничена, погрешность оценок (замеров) на объекте может быть неизвестной или превосходить требуемую погрешность моделирования. Считается, что получить абсолютно полную и достоверную информацию о реальном объекте невозможно даже теоретически (предел Бремерманна и теорема Геделя). Если все же предположить, что истинные свойства объекта нам известны, тогда зачем мы его моделируем? Эти трудности и противоречия носят принципиальный, в определенном смысле, философский характер, поэтому проблема проверки адекватности модели объективно присутствует всегда. В каждом конкретном случае она решается лишь в большей или меньшей степени удовлетворительности. Методы обеспечения и проверки адекватности являются отдельной темой, которая выходит за рамки предлагаемого издания. Поэтому можно ограничиться ссылками на литературу, в которой этот вопрос освещается детально.

1.3.6. Общие рекомендации по разработке моделей

Модель должна строиться под определенную задачу, а не воспроизводить ПС вообще.

Ошибкой является попытка моделировать ПС во всех подробностях, полагая, что от этого модель становится совершеннее, так как приближается к оригиналу. Ведь мы потому и моделируем сложный объект, что не можем постичь его умозрительно. Точно так же мы не сможем постичь и сложную модель этого объекта, и как следствие — сделать правильные выводы по ее результатам. Затратив большие усилия, на выходе может оказаться, что получена бесполезная модель.

Верный подход заключается, напротив, в создании модели максимально простой, но в то же время достаточно адекватной для решения очерченных практических задач. В модели ПС следует оставить только то, что существенно влияет на результат, а второстепенные детали отбросить. *Говоря терминами закона Парето («80/20%»)*, упрощение модели долж-

но касаться тривиального большинства, не затрагивая жизненно важного меньшинства. Искусство моделирования как раз и заключается в нахождении границы между этими большинством и меньшинством.

При разработке модели ПС первостепенное значение имеет не выбор метода и математического аппарата, а тщательная проработка постановочной части. Следует досконально изучить объект, уяснить суть проблемы, выявить запросы заказчика (потребителей), четко определиться, что хотим от моделирования, уточнить состав и качество располагаемых ИД. Тезис «правильно сформулированная задача — половина решения» при моделировании ПС не является большим преувеличением.

Разработка модели ПС должна вестись поэтапно. Начинать нужно с простой модели и постепенно ее усложнять — добавлять факторы, элементы, состояния и переменные, переводить константы и параметры в переменные, заменять детерминированные величины случайными, снимать ограничения, отказываться от допущений и т. д. После каждого этапа следует добиваться полной преемственности результатов новой и предыдущей модели. Все предыдущие версии должны сводиться при соответствующих ИД к частному случаю версии текущей.

Таким образом, *модель* — это упрощенный аналог объекта-оригинала, подобный ему по некоторым свойствам. Понятие «моделирование» используется в тройном смысле — как создание модели, как исследование самой модели и как экспериментирование с объектом на модели. Для объектов, относящихся к категории сложных систем, к которым относятся ТС и ПС, моделирование объективно необходимо, что обусловлено их сложностью, высокой стоимостью, уникальностью и *недоступностью для* натурального эксперимента.

Из всех отличительных свойств сложных систем труднее всего поддаются отражению в моделях связность, эмерджентность и развитие во времени. Основным методом моделирова-

ния сложных систем является математическое, аналитическое, имитационное и статистическое.

Самыми полезными моделями, например ПС, являются модели функционирования, так как они дают конечную оценку соответствия ПС их назначению. Вместе с тем модели функционирования являются наиболее сложными, так как, уже включая в себя модели свойств и структуры, дополнительно должны учитывать еще и динамику. Несмотря на всё разнообразие моделей, все они имеют одинаковый состав структурных элементов: входы, выходы, критериальное пространство, ограничения, параметры, возмущения и функциональные зависимости.

Важнейшим требованием к моделям является адекватность. Компонентами адекватности выступают достоверность, отсутствие внутренних ошибок, точность и доверие результатам. Соответственно видами проверки модели на адекватность являются валидация, верификация, анализ точности и аккредитация.

Абсолютно надежных методов проверки на достоверность не существует, поэтому проблема адекватности объективно присутствует во всех моделях. В целом, моделирование является неформальным творческим процессом. Искусство моделирования заключается в нахождении компромисса между требованиями максимального упрощения модели и обеспечения достаточной адекватности.

Контрольные вопросы

1. Какими взаимоисключающими признаками характеризуется любая техническая система?
2. Как проявляются свойства технической системы?
3. Раскройте суть понятия «технический процесс».
4. Охарактеризуйте различия между моделью и реальностью.
5. Изобразите модель «чёрного ящика» и укажите какими видами связи она обладает.

6. Изобразите модели структуры размерных связей деталей.

7. Дайте определение понятий математической модели, фактора, отклика факторного пространства.

8. Охарактеризуйте жизненный цикл технической модели.

9. В чём заключается управление технической системой?

10. Охарактеризуйте понятие «актуальность модели» и укажите какие виды связей она отражает.

11. Дайте характеристику цифрового имитационного моделирования.