

658.5
Б95

В. П. БЫКОВ

**МЕТОДИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

САПР

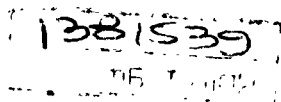
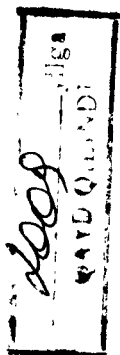
В МАШИНОСТРОЕНИИ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

0185
505

В. П. БЫКОВ

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР В МАШИНОСТРОЕНИИ



Ленинград
"Машиностроение"
Ленинградское отделение
1989

ББК 30.2-5-05

Б95

УДК 658—512.011.56.005: 621

Рецензент Е. А. Аврутов

Быков В. П.

Б95 Методическое обеспечение САПР в машиностроении. —
Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. — 255 с.

ISBN 5-217-00556-4

В книге рассмотрены современные проблемы проектирования, определены его основные операции и процедуры, логическая схема последовательности их выполнения. Приведены методы построения математических моделей объекта проектирования на стадиях разработки от исходного описания до составления технического проекта. Описание проектных операций и процедур ориентировано на применение ЭВМ, доведено до алгоритмов и представлено в соответствии с Методическими указаниями РД 50-245-81. Даны конкретные примеры.

Для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и применением САПР.

Б $\frac{2004060000-008}{038 (01)-89}$ 8—89

ББК 30.2-5-05

ISBN 5-217-00556-4 © Издательство «Машиностроение», 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Автоматизация проектирования порождена научно-технической революцией и стала характерной чертой ее нового этапа. Начав свое развитие с эпизодического использования ЭВМ в середине нынешнего столетия, она к его концу превращается в организационно-техническую систему, носящую в нашей стране название: «Система автоматизированного проектирования» (САПР).

С развитием САПР в машиностроении связывают решение его главной задачи — кардинального сокращения сроков создания новой техники, воплощающей прогрессивную технологию, многократно повышающей производительность труда и обладающей более высокой надежностью и более низкой материалоемкостью и энергоемкостью по сравнению с существующими машинами.

Автоматизация проектирования такой же неотвратимый процесс, как и автоматизация производства. В том и другом случае цель одна — повышение производительности труда и качества продукции. Однако, если в производстве автоматизация прочно завоевала свои позиции и не вызывает ни у кого сомнений, то в проектировании ее позиции не так прочны и бесспорны. В чем же причина? Несмотря на то, что проектирование входит составной частью в процесс создания новой техники и в этой связи относится к производственной деятельности человека, в нем весьма существенны творческие начала, что придает ему черты искусства, а автоматизм и творчество — понятия противоречивые. Доведенный до автоматизма труд перестает быть творческим. Но как и любые другие противоречивые понятия, автоматизация и творчество существуют в диалектическом единстве. Их объединяет мастерство. Творческий работник, будь он художником, музыкантом или конструктором, считается мастером, если в совершенстве владеет техникой своей профессии, техникой, доведенной до автоматизма. Не в замене человека машиной видится задача САПР, а в совершенстве техники проектирования (конечно, под техникой проектирования следует понимать не только чертежные инструменты и письменные принадлежности, так как это и средства выполнения тех или иных операций и процедур). Опытный конструктор владеет приемами и методами поиска вариантов технических решений, их сравнения и выбора наилучшего, анализа технических систем, синтеза, определения оптимальных параметров и др.

Следует остановиться на соотношении понятий проектирования и конструирования. Первое из них закреплено ГОСТ 22487—77 и определяется как процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего

объекта. Второе стандартом не закреплено и поэтому используется по-разному. Одни считают его синонимом проектирования, другие вкладывают в него более широкий или более узкий смысл. Будем придерживаться той бытующей точки зрения, что конструирование — составная часть проектирования и связана с теми его этапами, где принятое техническое решение получает конкретное, конструктивное воплощение. Несмотря на некоторое сужение понятия конструирования по сравнению с проектированием, специалистов, занимающихся разработкой новой техники, будем называть конструкторами, ориентируясь на конечный результат — конструкцию объекта проектирования.

В последние годы вышел в свет ряд книг отечественных и зарубежных авторов, посвященных методам проектирования. Назрел момент систематизировать накопленные знания для построения методического обеспечения автоматизированного проектирования.

САПР уже сейчас в состоянии помочь конструктору при выполнении многих процедур и операций. Это прежде всего относится к проектировочным и проверочным расчетам, к поиску необходимой информации, к проведению кинематического и динамического анализа объекта проектирования, оптимизации его параметров, математическому и геометрическому моделированию. Делаются попытки и к созданию элементов САПР для поискового конструирования, включая синтез вариантов технических решений и выбор из них оптимального. Уже широко применяется автоматизированный расчет и конструирование деталей машин, некоторых узлов и других простых изделий.

Однако несмотря на заметные успехи САПР, охватывающей все стадии разработки от технического задания до рабочей документации, пока нет ни в одной области техники. Это объясняется тем, что до сих пор не удалось дать формальное описание процесса проектирования, которое позволило бы использовать средства САПР на всех стадиях разработки проектной документации.

В предлагаемой читателю книге сделана попытка такого описания. Автор исходил из следующих концепций:

- 1) процесс проектирования — одна из разновидностей трудовой деятельности, основные закономерности которой уже вскрыты во многих трудах и в первую очередь в трудах основоположников марксизма-ленинизма;

- 2) при любом уровне автоматизации проектирования человек (конструктор) всегда будет основным элементом системы, за ним останется окончательный выбор проектных решений;

- 3) форма проектной документации при работе с использованием САПР со временем претерпит существенные изменения, однако стадийность проектирования, которая в настоящее время проявляется в последовательной разработке технического задания, технического предложения, эскизного проекта, технического проекта и рабочей документации, отвечающая диалектике про-

цесса распознавания объекта проектирования в среде его окружения, стратификации его описания, остается неизменной и для САПР.

Автор придерживается той, бытующей среди исследователей САПР, точки зрения, что методическое обеспечение выходит за рамки собственно САПР и объединяет логику процесса проектирования, методы и алгоритмы выполнения проектных процедур и операций, ориентированных на использование ЭВМ, методы описаний объекта проектирования на последовательных стадиях разработки. Именно это содержание и вкладывается в название книги.

Материал для книги собран автором в ходе длительной подготовки к чтению курса «Основы проектирования машин» в Ленинградском орденов Ленина и Октябрьской революции институте инженеров железнодорожного транспорта имени академика В. Н. Образцова. Этот курс введен в учебные планы транспортных вузов с 1983 г. Для примера, иллюстрирующего методы выполнения некоторых процедур, взята проектная разработка, выполненная под руководством автора студенческим конструкторским бюро кафедры «Строительные и дорожные машины и оборудование». Объект проектирования — машина для нарезания щелей в массиве мерзлого грунта — несложен и поэтому процедуры его создания «обозримы» и не загромождают изложение основного материала. Вместе с тем машина, созданная на основе проекта, получила признание производителей, экспонировалась на ВДНХ, ее создатели удостоены медалей выставки.

Отраженная в книге попытка дать формальное описание всего процесса проектирования относится к первым и не может претендовать на безупречность. Все замечания по содержанию книги будут приняты с благодарностью.

Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ ВОЗЗРЕНИЕ НА ПРОЦЕСС И ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. СТАНОВЛЕНИЕ НАУКИ О ПРОЕКТИРОВАНИИ

Прежде, чем что-либо создать, человек формирует в своем воображении субъективную модель предмета труда. Дальнейшая его деятельность заключается в ее реализации. Эти два условных этапа трудового процесса назовем: проектирование и исполнение. Если в трудовом процессе участвует один человек, то модель предмета труда может замыкаться внутри его собственных представлений и понятий. Так было в эпоху ремесленного производства, когда изделия создавались мастером кустарным способом без какой-либо видимой подготовки; так бывает и теперь, если предмет труда представляет собой несложный объект. Как только в трудовой процесс вовлекается другой участник, так появляется необходимость передать ему информацию о предмете труда. Делается это в том или ином условном коде — в форме речи, словесного или графического описания.

До появления письменности формами проектирования и конструирования были устные советы и модель [36]. Начало использования чертежей на Руси относят к XI в. В то время они представляли собой чертежи-рисунки, чертежи-схемы. Широкое использование чертежей при конструировании наступило в период мануфактур. В XVIII в. чертежи стали выполнять в масштабе. В 40-х гг. этого столетия в изображениях появились «профили», в 70-х гг. — прорези и вертикальные разрезы. В России преподавание черчения в специальных технических школах было введено по указу Петра I. Одну из таких школ окончил И. И. Ползунов. Сохранились чертежи многочисленных сложных механизмов и станков, выполненных И. П. Кулибиным. Несмотря на заметные успехи в проекционном черчении, основной формой конструирования оставалось изготовление модели, а чертежи составлялись уже по ней. К моделям прибегали все известные механики того времени — А. К. Нартов, И. И. Ползунов, И. П. Кулибин, Л. Ф. Сабакин и др. Модели были достаточно больших размеров, зачастую действующими.

В XVIII в. появились книги, содержащие некоторые сведения о расчетах механизмов. Среди них «Арифметика» Л. Ф. Магницкого, включавшая, в частности, задачи по зубчатым передачам. В 1722 г. вышла в свет первая в России печатная книга по механике, написанная президентом Морской академии в Петербурге Г. Г. Скорняковым-Писаревым «Наука статическая или Механика». Первой книгой по машиностроению считают книгу А. К. Нартова «Театрум махинарум, то есть Ясное зрелище махин». Первая ее глава посвящена принципам проектирования

машин. В ней говорится, что сложные машины «составляются из некоторого числа простых машин, которыми называются одинаковые, т. е. несложные машины», приведены «машинные члены», «железные валы и прочие».

Теоретические основы проектирования механизмов были заложены академиком Л. Эйлером (вторая половина XVIII в.) созданием теории эвольвентного зацепления, ременных передач, ленточных тормозов. Им же была предпринята попытка изучения машин с учетом динамики. До этого динамика была чисто теоретической наукой, обособленной от машин. Вслед за Л. Эйлером появились труды Я. П. Козельского и С. К. Котельникова, рассматривающие механизмы с позиций динамики. К концу XVIII в. центром развития механики становится Франция. Этому способствовали работы Ж. Лагранжа.

В России заметный вклад в науку о машинах внесли ученые Петербургского института инженеров путей сообщения. В нем работали видные русские математики и механики — академики В. И. Висковатов, С. Е. Гурьев, Д. С. Чижов, М. В. Остроградский, В. Я. Бунковский, И. И. Сомов, крупные французские ученые П. Базен, Б. Клапейрон, Г. Ляме, К. Потье. Основатель института — А. Бетанкур — один из пионеров кинематики машин, выдающийся конструктор. В библиотеке института бережно хранятся многие его труды. В их числе чертежи дноуглубительной машины с паровым двигателем, созданной в 1810 г. для работы в Кронштадтском порту. Сохранились и отзывы о ней современников. Восторгаясь, они отмечали «устрашающее» впечатление от ее мощности (на ней был установлен паровой двигатель в 15 л. с.).

В 1809 г. в институте впервые в России начал читать курс начертательной геометрии профессор Я. А. Севастьянов; в 1823 г. появился труд Д. С. Чижова «Записки о приложении начал механики к исчислению действия некоторых из наиболее употребительных машин».

XIX в. ознаменован многочисленными достижениями в технике, опережающими развитие науки и служившими для нее благоприятной почвой. Если считать основными две метапроцедуры проектирования: 1) поиск и принятие решения; 2) описание и преобразование описаний объекта, то весь предшествующий исторический период был связан с развитием второй из них. Начертательная и аналитическая геометрия, черчение, теоретическая механика, теория машин и механизмов, детали машин и другие дисциплины дают аппарат для ее выполнения.

Основным документом, закрепляющим в настоящее время в законодательном порядке последовательность этапов проектирования, форму и содержание технических документов, является Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Если же попытаться проследить развитие методов выполнения метапроцедуры поиска и принятия решений, то в них еще нельзя найти

таких больших достижений. До сих пор можно стать свидетелями спора о том, что такое проектирование — наука или искусство. Правильный ответ был и остается один — проектирование это и наука, и искусство (искусство потому, что оно неразрывно связано с творчеством, наука потому, что опирается на обобщенные и систематизированные знания). В разные эпохи доли того и другого начала были различны. Вспомним эпоху Возрождения.

К техническому творчеству обращались многие выдающиеся мыслители, художники. По мере развития и совершенствования техники одних творческих способностей становится недостаточно. Сейчас даже самый талантливый художник вряд ли возьмется за инженерное проектирование, если у него нет специальных знаний. И в то же время еще много в процессе проектирования связано с творческими способностями человека, его воображением и интуицией.

Творчество будет всегда необходимо проектированию. Однако весь ход исторического развития его методов свидетельствует о том, что неуклонно возрастает число операций, переходящих в разряд формализованных, выполняемых по определенным алгоритмам.

Обратимся к фундаментальным исследованиям в области теории механизмов академика И. И. Артоболевского. Проектирование механизмов рассматривается как сложная комплексная проблема, решение которой рекомендуется разбить на несколько самостоятельных этапов: 1) установление основной кинематической схемы механизма, отвечающей требуемому виду и закону движения; 2) разработка конструктивной формы механизма, обеспечивающей его прочность, долговечность, высокий коэффициент полезного действия и т. д.; 3) достижение технологических и технико-экономических показателей проектируемого механизма, определяемых эксплуатацией в производстве и ремонтом.

Теория машин и механизмов берет на себя методы, с помощью которых может быть решен первый этап проектирования — разработка кинематических схем механизмов, воспроизводящих требуемый закон движения. При этом учитываются вопросы второго и третьего этапов: коэффициент полезного действия, возможность изготовления деталей и их сборки.

Раздел теории механизмов, посвященный методам проектирования, носит название синтеза механизмов. Основные задачи синтеза: 1) преобразование вращательного движения вокруг одной оси во вращательное движение вокруг другой; 2) преобразование вращательного движения в поступательное; 3) преобразование поступательного движения вдоль одной заданной прямой в поступательное движение вдоль другой; 4) воспроизведение одной из точек звеньев механизма требуемой траектории. При решении вышеназванных задач учитываются структурные, кинематические, динамические и метрические условия.

Общая постановка задачи синтеза механизмов сводится к следующему. Заданы законы движения ведущего и ведомого звена в виде функции положения или функции передаточного отношения. Необходимо подобрать механизмы, преобразующие движение ведущего в движение ведомого звена. Не только синтез, но и анализ механизмов используется при проектировании. Но весь этот аппарат вступает в силу лишь тогда, когда выбрана кинематическая схема, т. е. на стадиях, связанных с разработкой эскизного и технического проектов, рабочей документации. Что же касается технического задания и технического предложения, то решаемые при их выполнении задачи выходят за рамки традиционной теории машин и механизмов.

Развитие техники в XX веке столкнулось с рядом противоречий. Первое из них заключается в преобладании темпа роста сложности технических систем (ТС) над развитием методов их проектирования. Возрастание сложности ТС проявляется в увеличении количества входящих в нее подсистем и элементов (по данным [1] в среднем по всем отраслям техники число подсистем и элементов в ТС удваивается через каждые 15 лет). Растет также разделение труда и число специалистов, разрабатывающих ТС; осложняется согласование действий, теряется представление о разрабатываемой ТС как о едином целом (ТС иногда оказывается малоэффективной или неработоспособной, несмотря на высокие показатели ее подсистем и элементов).

Второе противоречие проявляется во взаимодействии таких факторов, как продолжительность разработки и срок морального старения ТС. Оба фактора измеряются временем, причем срок разработки с повышением сложности ТС возрастает, а время до морального износа, из-за ускорения научно-технического прогресса, неуклонно снижается. Устранение этого противоречия может быть достигнуто, во-первых, повышением производительности труда в проектировании, а во-вторых, построением ТС на основе перспективных технических решений. С начала века производительность труда в проектировании возросла лишь на 20 %, в то время как в производстве — на 1000 %. Поиск перспективных технических решений в условиях традиционных методов и средств проектирования осложняется из-за постоянного роста объема научно-технической информации, увеличивающегося в два раза через каждые восемь лет.

Ко всему этому в настоящее время остро ощущается дефицит конструкторов. Практика настоятельно требует совершенствования методов проектирования. Прежде всего это относится к первой метапроцедуре — поиску и принятию решения. Выдающиеся ученые в прошлом нередко задумывались над тем, как появляются в сознании человека те или иные решения. Однако их современников больше интересовал результат творчества, нежели его ход. Поэтому исследований в области методов поиска технических решений было сравнительно немного.

1.2. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Задачу поиска технических решений, не поддающуюся известным математическим и логическим методам, можно отнести к эвристическим. Эвристика как искусство решения трудных проблем получила свое название от известного возгласа Архимеда: «Эврика» (нашел). Начало учения об эвристических методах было положено Сократом (469—399 гг. до н. э.). Майотика (или «акушерское искусство») Сократа заключалась в построении бесед, рождающих идеи и развивающих их на основе вскрытия противоречий. Методы построения предположений или гипотез с помощью механических представлений (моделей) содержатся в работах Архимеда (287—212 гг. до н. э.), в частности, в «Учении о методах механики». Папп (IV в. н. э.) обобщил эвристические методы античных философов и математиков, ввел название «Эвристика».

Раймунд Лиллей, философ позднего средневековья, пытался создать систему, позволяющую путем комбинирования некоторых принципов и понятий получать все познания человеческого разума. Рене Декарт (1596—1650 гг.) разрабатывал метод решения любых проблем разложением их на простые составляющие, сводимые к математическим задачам. Идеи Лиллея и Декарта не могли быть осуществлены, однако они послужили Лейбницу (1646—1716 гг.) в создании комбинаторики. Интерес к эвристическим методам и, в частности, к комбинаторике возрос в нынешнем столетии, а в настоящее время — особенно.

Идеи комбинаторики нашли отражение в широко известном методе «морфологического анализа», названном так американским астрономом Францем Цвикки.

Необходимость конструктору знаний, выходящих за рамки собственно механики, отмечал профессор А. П. Сидоров в своей книге «Основные принципы проектирования и конструирования машин», изданной в 1929 году: «Как для проектирования самых разнообразных машин и сооружений (инженерных, гражданских, сельскохозяйственных, дорожных и пр.), — отмечает А. П. Сидоров — так и для выполнения их при посредстве станков и людей, инженеру необходимо знакомство как с основными научными предметами — математикой, механикой, физикой и химией и вообще с естественными науками, так и со специальными техническими весьма разнообразными дисциплинами, составляющими программу высшего технического образования; но для проектирования машин и сооружений разного назначения инженеру приходится знать, и иногда весьма детально, условия работы того, для чего или для кого назначается машина или постройка, технические процессы, для которых он строит станки, характер и вкусы публики, для которой будут делаться машиною изделия (ручные машины, оружие, материи и т. д.). Для постройки ауди-

торий театров и концертных залов необходимо знать акустику и музыку, для постройки конюшни для лошадей или хлева для свиней — нравы этих животных и т. д.».

По мнению Ф. Ханзена в творчестве требуется систематизация [57]. Область возможных решений может быть обследована и тогда любая новая идея окажется новой комбинацией известных элементов. От интуиции можно и не отказываться, однако, ее следует контролировать. Тот факт, что многие высокоодаренные конструкторы не следуют какой-либо конкретной методике, не означает вовсе ее отсутствие, они пользуются ею сами того не подозревая. Начинаям конструкторам необходимо пользоваться этой методикой сознательно.

Интересно сопоставление Ф. Ханзеном исследования и проектирования. Первое предполагает, по его мнению, движение от явления к сущности, второе — наоборот, от сущности к явлению. Для отыскания пути к лучшему решению желательно иметь ясное и простое указание к действиям в виде рабочих методов, сведенных в обозримую систему. Основным принципом построения системы Ф. Ханзен считает принцип подразделения, следуя которому процесс создания нового технического объекта разбивается на последовательные этапы. Он выделяет четыре этапа проектирования. На первом в результате продумывания выделяется ядро задания, в котором заключена совокупность всех возможных решений. Описание ядра задания формирует основной принцип. Итогом выполнения второго этапа является описание возможных рабочих принципов и функций, подлежащих выполнению. На третьем этапе производится анализ ошибок в выполнении функций по каждому рабочему принципу. Под ошибками понимаются любые недостатки. Путем их устранения приходят к улучшенным рабочим принципам. Четвертый этап проектирования Ф. Ханзен связывает с выбором улучшенного рабочего принципа, имеющего наименьшее число ошибок.

П. Хилл [58] во введении к своей книге «Наука и искусство проектирования» говорит о инженерном проектировании, как об особой науке, систематизирующей знания и уделяющей особое внимание этапам проектирования и их взаимосвязи. О методике он говорит: «Методика проектирования — это не формула и даже не инструкция, а последовательность событий, составляющих процесс проектирования, в рамках которого возможно логическое развитие конструкции». Основные этапы проектирования по П. Хиллу представлены на рис. 1.1.

Содержание этапов сводится к следующему: определение потребности — столкновение конструктора с ситуацией, которая раздражает и волнует, в результате чего у него возникает потребность в изменении существующего положения; определение цели — формулировка в общих выражениях характеристик проектируемого объекта, которые удовлетворяют эту потребность; научные исследования — сбор всей доступной информации для

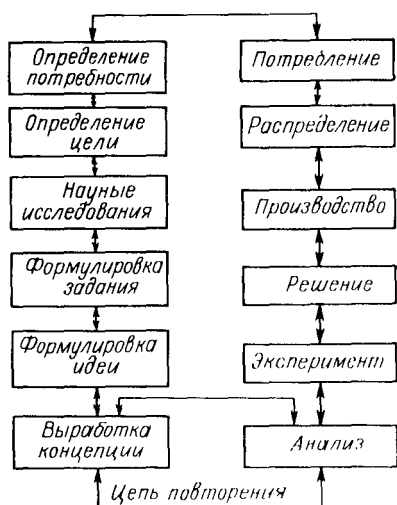


Рис. 1.1. Основные этапы проектирования по П. Хиллу

вании, методы изготовления продукции, календарное планирование, контроль качества и приемочный контроль; распределение продукции — установление конкурентоспособности цен, реклама, нахождение рынков сбыта, обеспечение прибыли; потребление — контакты с потребителями, ремонт, обслуживание.

Методы проектирования, рассмотренные П. Хиллом, призваны организовать процесс. Основными из них являются: наглядное представление заданной функции, служащее переходным звеном между поставленной задачей и ее решением и способствующее расширению информационной основы творчества; диаграмма идей, дающая наглядное представление о развитии техники в интересующей области; матрица идей, представляющая собой средство морфологического анализа независимых переменных и позволяющая вырабатывать различные сочетания характеристик проектируемого объекта, что порождает альтернативные идеи; мозговой штурм, дающий возможность получения новых идей путем творческого сотрудничества членов организованной группы специалистов (основной девиз метода: «Чем больше идей, тем лучше»; синектика, отличающаяся от мозгового штурма тем, что обсуждение ведется в направлении поиска небольшого числа идей (двух—трех), однако с детальным их рассмотрением (в процессе обсуждения основную роль играет руководитель; в группу включаются специалисты различных профессий).

Особо следует остановиться на методе, связанном с принятием наилучших решений из совокупности вариантов. Он основывается на построении матрицы решений. Сущность метода заключается в выборе критериев для сравнения вариантов, определении их относительной значимости (веса в долях единицы) и оценки вари-

решения задач, вытекающих из поставленной цели; формулировка задания — перечень данных и параметров, обеспечивающих достижение поставленной цели; формирование идей — процесс рождения новых идей; выработка концепций — выработка вариантов возможных решений для достижения поставленной цели; анализ — проверка выбранных концепций на соответствие физическим законам; эксперимент — создание опытного образца и лабораторные испытания; решение — описание проектируемого объекта (рабочие чертежи, технические условия); производство — определение объема производства и потребности в производственном оборудовании; потребление — использование продукции.

антов по каждому из критериев в десятибалльной системе. Наилучшим вариантом считается тот, у которого наибольшая сумма произведений оценок на относительный вес соответствующих критериев. Метод дает возможность сравнить варианты, представленные лишь принципиальными схемами, не содержащими параметрической информации.

Особое значение П. Хилл придает морфологическому подходу к проектированию, связанному с логической организацией идей, что отличает его от традиционного подхода, основанного лишь на интуиции и опыте.

Значительный арсенал новых методов проектирования содержится в книге Дж. К. Джонса [20]. По его мнению проектирование следует понимать как «процесс, кладущий начало изменению в искусственной среде». Тем самым он подчеркивает, что проектирование состоит не только в изготовлении рабочих чертежей, но и в планировании всех этапов существования будущего изделия. Таким образом, Дж. К. Джонс полагает, что традиционные методы проектирования связаны лишь с созданием самого объекта проектирования и в меньшей степени затрагивают социальные, политические и другие ситуации, возникающие в результате внедрения проектируемого объекта. Новые же методы проектирования отличаются системным подходом. В развитии методов проектирования он видит следующие этапы: кустарный промысел, чертежный способ проектирования и современное системное проектирование.

Общей отличительной особенностью всех новых методов проектирования является стремление «думать вслух». Достигается это использованием какой-либо схемы, позволяющей разбить задачу проектирования на части и указать взаимные связи между этими частями. В основе всего лежит стремление добиться большего контроля над процессом проектирования со стороны всех заинтересованных членов общества.

Все новые методы проектирования можно разделить на группы в зависимости от того, какие из концепций положены в их основу. Дж. К. Джонс рассматривает три концепции: проектировщик — «черный ящик», проектировщик — «самоорганизующаяся система», проектировщик — «прозрачный ящик»

Первая из них построена на предположении о полной «алогичности» процесса творчества, когда проектировщик, принимая то или иное на его взгляд удачное решение, не может объяснить, каким образом ему удалось его отыскать. К методам, базирующимся на этой концепции, относятся: мозговой штурм (мозговая атака) и синектика.

Концепция «прозрачного ящика» построена на предположении о том, что проектировщик вполне осознает свои действия и их причины. Логическое или систематическое поведение проектировщика включает: анализ получаемой и имеющейся информации; синтез технических решений; их оценку и повторение циклов до

тех пор, пока не найдет наилучшее из всех возможных решений.

Методы, построенные на концепции «прозрачного ящика», характеризуются следующими общими чертами: 1) цели, переменные и критерии задаются заранее; 2) поиску решения предшествует проведение (или хотя бы попытка проведения) анализа; 3) оценка результатов дается в основном в словесной форме и построена на логике; 4) заранее фиксируется стратегия (обычно используются последовательные приемы, условные и циклические операции).

Коренным вопросом при применении «прозрачного ящика» является возможность расчленения задачи на отдельные части, каждая из которых в дальнейшем может считаться самостоятельной.

По мнению Дж. К. Джонса целью методологии проектирования является уменьшение цикличности и увеличение линейности проектирования. Цикличность связана с вынужденным повтором этапов работы в результате того, что некоторые, оказавшиеся важными, частные задачи вначале не были учтены. Линейность предполагает, что все важнейшие проблемы можно обнаружить с самого начала и вероятность появления неучтенных частных задач сводится к минимуму. Существенным методом обеспечения линейности проектирования Дж. К. Джонс считает прогнозирование, позволяющее определить диапазон возможных выходов из этапов проектирования до их выполнения. Подход к проектировщику, как к «самоорганизующейся системе» вызван стремлением сузить область поиска технических решений за счет обоснованного выбора стратегии. Для этого необходим метаязык из терминов, достаточно широких по значению, чтобы с их помощью можно было, во-первых, описать зависимости между стратегией и проектной ситуацией, и, во-вторых, проводить оценку модели, позволяющую предсказать вероятные результаты альтернативных стратегий, с тем, чтобы можно было выбрать наиболее перспективную из них. Дж. К. Джонс выделяет три ступени проектирования: дивергенцию, трансформацию и конвергенцию.

Дивергенция — расширение границ проектной ситуации в целях обеспечения достаточно обширного пространства для поиска решений. На этой ступени автор не рекомендует принимать решение, отложив его до тех пор, когда проектировщик будет достаточно знать обо всем, что связано со стоящей перед ним задачей. Дивергенция больше связана с исследованием, чем с проектированием.

Трансформация — стадия создания принципов и концепций, т. е. пора высокого творческого вдохновения, догадок и озарений. На этой стадии возникает общая концептуальная схема проектируемого объекта, которая по мнению Дж. К. Джонса кажется удачной, хотя это и нельзя доказать.

Конвергенция — стадия окончательного выбора варианта технического решения. К этому времени задача определена, переменные найдены, цели установлены. Здесь в наибольшей степени могут быть использованы технические средства автоматизации проектирования.

Под стратегией проектирования Дж. К. Джонс понимает последовательность этапов, на каждом из которых применяется тот или иной метод проектирования. Стратегии могут быть: линейными, когда этапы выполняются строго последовательно; циклическими, если после выполнения одного из этапов необходимо вернуться и повторить предыдущие этапы; разветвленными, позволяющими выполнять отдельные этапы параллельно; адаптивные, при которых выбор каждого из этапов зависит от результатов выполнения предыдущего; случайного поиска, отличающегося абсолютным отсутствием плана, когда при выборе последующего этапа совершенно не учитывают результаты предыдущего.

Выбор той или иной стратегии по Дж. К. Джонсу зависит от степени заданности, т. е. от содержания и объема исходной информации и от схемы поиска. В некоторых случаях рекомендуется прибегать к методам управления стратегиями, позволяющим придерживаться одной стратегии лишь до тех пор, пока она остается перспективной и заменять ее, если она перестает соответствовать окружающей обстановке.

А. Холл [59], рассматривая методологические основы разработки систем, выделяет шесть процедур: уяснение задачи, выбор целей, синтез систем, анализ систем, выбор наилучших альтернатив, планирование действия.

Методами выполнения процедуры уяснения задачи являются: исследование потребностей и окружения, метод входов и выходов. Исследование потребностей связано с определением требований к проектируемой системе, на основе которых составляется общая программа разработки. При этом рассматриваются четыре основных направления планирования проектов: расширение и обновление функций, улучшение технических характеристик, снижение стоимости, улучшение внешних качеств. Под окружением А. Холл понимает множество всех предметов вне системы, изменение признаков которых влияет на систему, а сами признаки изменяются вследствие поведения системы. Основными факторами окружения считаются: состояние технологии, естественное окружение (климат, растительность), политика организации, экономические условия для новых систем, человеческие факторы. Успех проектирования, по мнению А. Холла, измеряется близостью соответствия, т. е. степенью интеграции с окружением.

Выбор целей А. Холл считает одной из самых важных процедур проектирования. Цели связаны с системой ценностей, являющейся специфичной для вида проектируемой системы. Однако некоторые из элементов системы ценностей оказываются

общими для всех систем. Из них А. Холл, например, называет: прибыль, рынок, стоимость, качество, технические характеристики, совместимость с уже существующими системами, приспособленность к окружению, стойкость против морального старения, простоту и изящество, безопасность в обслуживании, время на разработку.

В качестве методов синтеза систем А. Холл предлагает мобилизацию идей и функциональное проектирование. Мобилизация идей означает сбор всех известных альтернатив и выработку новых без поспешной критики. Всегда должен быть более чем один путь решения задачи, хотя бы ради того, чтобы ослабить приверженность к одному пути.

Функциональное проектирование представляет наиболее общий подход к описанию систем. Определяются граничные условия и желательные входы и выходы, составляется подробный перечень функций или операций, которые должны выполняться. Метод в упрощенном виде сводится к составлению блок-схемы системы.

Процедура анализа систем состоит в выделении всех возможных следствий из альтернативных систем для выбора из них наилучшей. За такую систему принимается та, которая в большей степени отвечает поставленным целям. При анализе некоторые сведения получаются объективно, т. е. путем сбора опытных данных и нахождения распределения частот, другие — субъективно, путем интуитивного восприятия относительных частот, неявно отражающих объективные частоты. Для выбора оптимальной системы в условиях определенности, когда все следствия определены по шкале отношений, можно воспользоваться аппаратом математического программирования. Дело осложняется, когда следствия недостоверны, взаимозависимы и требуют различных шкал измерений. Какой-либо методики оптимизации рекомендовать здесь невозможно. Приводя в качестве метода оптимизации таблицу, подобную матрице решений, А. Холл обращает внимание на необходимость учета не только математического ожидания оценки следствия, но и дисперсии, показывая, что недостаточное внимание к последней может привести к существенным просчетам.

Дж. Диксон [21] считает, что настало время обучения не практике проектирования, а принципам и основам решения задач. Предмет «Инженерное проектирование» должен помочь научиться применять знания, приобретенные при изучении теоретических технических, общественных и гуманитарных дисциплин, к решению задач инженерной практики.

Инженерное проектирование он представляет в виде последовательных этапов, представленных на рис. 1.2. Дж. Диксон различает два рода деятельности: изобретательство и инженерный анализ. Первый связан с полетом фантазии, второй — требует самодисциплины и глубоких знаний. Необходимо уметь переключить

чатся с одного рода деятельности на другой. Среди методов изобретательства Дж. Диксон называет: мозговой штурм, инверсию, состоящую в отказе от прежних взглядов на задачу с тем, чтобы посмотреть на нее с некоторой новой или измененной позицией; аналогии, достигаемую заимствованием идей из биологии, фантастики, художественной литературы; эмпатию, означающую отождествление личности с предметом или другим лицом; системотехническое исследование новых комбинаций, состоящее в выделении основных элементов решения, в отыскании возможных способов их осуществления и в составлении различных комбинаций из них.

В. Гаспарский отмечает [14], что проектные действия не располагают пока необходимыми методологическими знаниями. По его мнению к методологии проектирования относятся: прагматическая методология проектирования, занимающаяся тем, как проектировать, т. е. описанием задач и процедур проектирования; апрагматическая методология, занимающаяся тем, что проектируется, т. е. продуктами проектирования.

Апрагматическая методология, изучающая объекты проектирования, — наиболее развитая часть инженерного проектирования, так как она накопила и систематизировала обширные знания (в области машиностроения это теория машин и механизмов, детали машин). В. Гаспарский высказывает мнение о том, что частные методологии уместны для апрагматических проблем, тогда как для прагматических вряд ли вообще уместно разрабатывать частные методики, так как проблемы прагматической методологии обнаруживают столь много общего, что могут быть охвачены общей методологией.

По В. Гаспарскому методология проектирования «...это научная дисциплина, занимающаяся методами, процедурами и технологиями проектно-творческой деятельности». В связи с этим он выделяет три основные задачи методологии проектирования: 1) выбор типов действий, совершаемых во время проектирования, и их анализ, ведущий к уточнению определенных действий; 2) обобщенное описание проектной процедуры, используемой в разных видах проектирования; 3) выявление целей, к достижению которых сознательно или неосознанно стремятся проектировщики, и установление критериев правильности действий в проектировании.

В. Гаспарский использует праксеологический анализ для принятия инженерных решений в проектировании. В основу

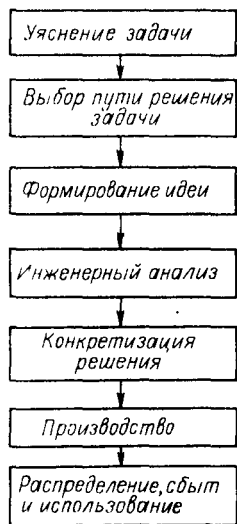


Рис. 1.2. Этапы проектирования по Дж. К. Диксону

метода положена гипотеза, утверждающая, что при заданных параметрах обособленной системы между проектными параметрами и критериальными величинами потребительских эффектов существует по крайней мере корреляционная зависимость.

Праксеология — общая теория эффективности действий. Согласно ей эффективность того или иного действия соответствует степени достижения цели при заданных затратах. Среди разновидностей эффективности праксеология на первое место выдвигает эффективность действия или результативность в достижении цели. «Цель действия определяет направление и структуру действия субъекта, стремящегося к тому, чтобы создать или сохранить желаемую ситуацию» [14].

Кроме цели праксеология вводит в рассмотрение такие оценки, как затраты на реализацию действия, результат и основной результат. Все эти оценки объединяются более общим понятием — эффектом действия. Цель — предвидимый максимально возможный эффект; результат — положительно оцениваемый достигнутый эффект; основной результат — положительно оцениваемый, не превышающий цели достигнутый эффект; затраты — отрицательно оцениваемый эффект.

Возросший интерес к методологии проектирования в последнее десятилетие вызван автоматизацией инженерного труда и в частности автоматизацией проектирования. Взаимосвязь этих научных направлений благотворно сказывается на каждом из них.

Автоматизация проектирования невозможна без знаний в области методологии. С другой стороны, автоматизация стимулирует развитие методов проектирования. Значительные успехи в автоматизации проектирования достигнуты в электронике, судостроении, авиастроении, станкостроении.

Схема процесса проектирования ЭВМ представлена на рис. 1.3 [54].

Звездочками на рисунке помечены этапы, выполняемые автоматизированно. Первый этап проектирования ЭВМ связан с разработкой структурной схемы, реализующей принятый принцип ее действия и включающей такие крупные блоки, как арифметическое устройство, основная память, устройство управления, логическое устройство, соединительная шина и др. На этом же этапе разрабатывается детальный список требований к схемам связи между элементами структурной схемы.

После окончательного выбора принципа действия и структурной схемы начинается детальная проработка элементов. Вслед за этим происходит синтез логической структуры и ее минимизация. Основными методами решения задач на этапах проектирования являются: логическое моделирование и теория графов.

М. Д. Принс [40] рассматривает проектирование как итеративный процесс (рис. 1.4). «Такой подход к проектированию, — утверждает он, — существует лишь потому, что нам не известно пока, как должен выполняться сразу синтез проекта. Мы умеем

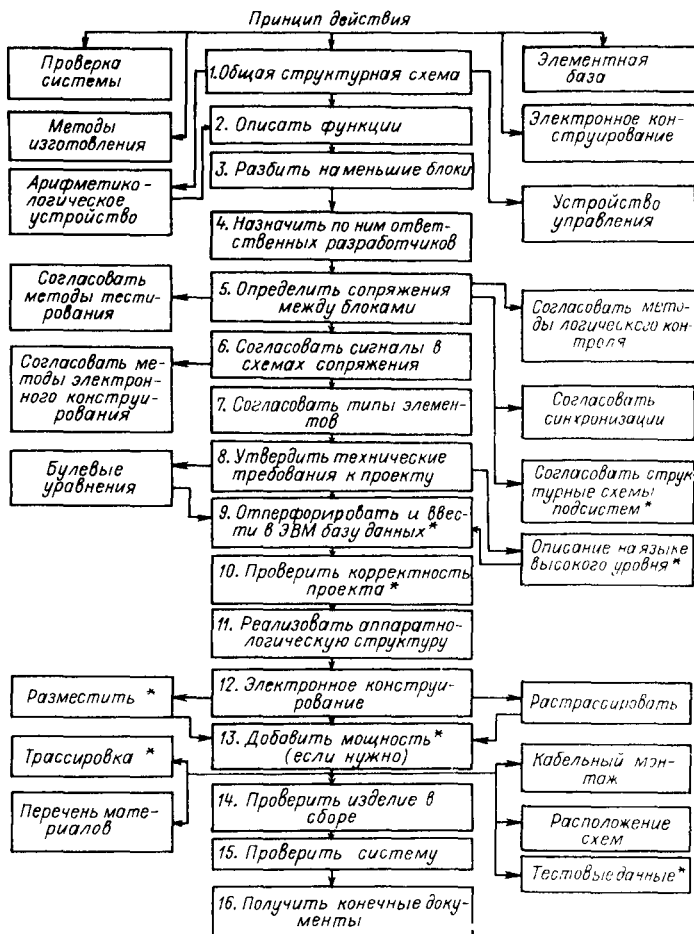


Рис. 1.3. Схема процесса проектирования ЭВМ по М. Брайнеру (* — этапы выполняются автоматизированно)



Рис. 1.4. Процесс проектирования по М. Д. Принсу

только анализировать пробный вариант, изменять его параметры и таким образом строить процесс, приводящий к решению». Такое утверждение сделано М. Д. Принсом в результате анализа деятельности крупнейшей в мире авиационной фирмы «Lock heed».

Подробный обзор этапов проектирования находим в работе [1]. Составлен он на основе ряда литературных источников, некото-

рые из которых уже рассматривались. Ниже приводится перечень этапов, составляющих так называемый «обобщенный эвристический алгоритм». Каждый этап содержит несколько процедур. Структурное описание алгоритма представлено формулой

$$A_{об} = E1, E2, ..., E17,$$

где $A_{об}$ — обозначение обобщенного эвристического алгоритма; $E1 ... E17$ — этапы проектирования.

В описание обобщенного эвристического алгоритма включается, кроме того, обозначение массивов информации ($M1, M2, ..., M8$).

Этапы обобщенного эвристического алгоритма означают: $E1$ — определение общественной потребности ($M1, M2$); $E2$ — определение цели решения задачи; $E3$ — предварительное изучение задачи ($M3, M4$); $E4$ — сбор и анализ информации о задаче ($M4$); $E5$ — исследование задачи; $E6$ — выбор параметров объекта и предъявляемых к нему ограничений (требований) ($M1$); $E7$ — уточнение формулировки задачи; $E8$ — формулировка конечного результата; $E9$ — выявление технических и физических противоречий в технической системе ($M5$); $E10$ — выбор поисковых процедур и эвристических приемов ($M6, M7$); $E11$ — поиск идей решения задачи; $E12$ — анализ и проработка идей решения задачи ($M3, M4$); $E13$ — выбор рациональных вариантов технического решения (ТР); $E14$ — выбор наиболее рационального варианта ТР ($M8$); $E15$ — развитие и упрощение ТР ($M6$); $E16$ — анализ технико-экономической эффективности найденного ТР ($M4$); $E17$ — обобщение результатов решения задачи.

Массивы информации означают: $M1$ — список требований, предъявляемых к ТР; $M2$ — список методов выявления недостатков в ТР; $M3$ — фонд физических эффектов (ФЭ); $M4$ — фонд ТР, включая последние наиболее эффективные решения; $M5$ — список методов выявления причин возникновения недостатков в ТР; $M6$ — фонд эвристических приемов; $M7$ — список поисковых процедур; $M8$ — список методов оценки и выбора вариантов ТР. При решении определенного класса задач, относящегося к группе областей техники и тем более к одной из них, авторы рекомендуют составлять частные алгоритмы, отличающиеся от обобщенного меньшим количеством процедур. В связи с этим процедуры разбиваются на универсальные, рекомендуемые к использованию в любом частном алгоритме, и частные, выбираемые с учетом специфики задачи.

Каждая процедура обобщенного и универсального алгоритма представляет собой определенную задачу проектирования. Стремясь к формализации процедур авторы разбивают их на следующие группы, в которых: 1) неизвестны ни входная, ни выходная информация, ни алгоритм переработки; 2) неизвестны входная информация и алгоритм переработки; 3) неизвестен алгоритм;

4) известны входная и выходная информация, алгоритм переработки.

Большинство процедур обобщенного алгоритма относится ко второй и третьей группе, в то время как формализовать можно лишь процедуры четвертой группы.

Основное внимание уделяется программированию эвристических приемов поиска новых технических решений. Основой таких приемов являются описание множества технических решений и оценка интересующих показателей любого технического решения из этого множества. Описание множества ТР может быть: 1) теоретико-множественное, описывающее ТР с помощью кортежей, соответствий, отношений и др.; 2) алгоритмическое, описывающее любой элемент множества ТР путем вычислений; 3) графическое, наглядно описывающее ТР чертежами, графиками и рисунками; 4) физическое, в котором элементы множества ТР представлены моделями.

В 40-х гг. нынешнего столетия были заложены основы функционально-стоимостного анализа (ФСА), получившего в дальнейшем широкое развитие. ФСА представляет собой методический инструмент проектирования, построенный на принципах: системности, функционального анализа и синтеза, стоимостной оценки функции, коллективного творчества.

Операции и мероприятия ФСА, выполняемые в определенной последовательности, регулируют качество объекта проектирования, приближая технические решения к оптимальному.

Основные приемы ФСА: 1) при поиске вариантов объект рассматривается как комплекс абстрактных функций; 2) каждая функция объекта проектирования и его элементов рассматривается системно; 3) техническая и экономическая отработка решений проводится параллельно; 4) ориентирами в процессе проектирования выступают допустимые лимиты затрат по функциям; 5) устранение бесполезных и вредных функций и элементов; 6) многовариантность технических решений; 7) алгоритмизация выполнения процедур и операций; 8) коллективный поиск решений.

Принцип системности, развиваясь, в дальнейшем определил новый подход к проектированию, ставшему в связи с этим часто называться системным проектированием. Процесс системного проектирования [39] базируется на формализованных множествах: M — модели объекта проектирования, A — исходные данные, C — ограничения, R — проектные решения, K — оценки проектного решения, T — решающие процедуры (методы). Логическая схема проектирования (ЛСП) строится на декомпозиции исходной задачи. Процесс проектирования определен, если задана пятерка множеств (S, A, C, T, R) , где S — непустое множество задач проектирования, а T — отображение, ставящее каждой паре (a_{s_i}, c_{s_i}) в соответствие некоторое непустое подмножество R .

В работе [39] методы проектирования предлагается делить на индуктивные и дедуктивные.

Индуктивный метод предполагает наличие требований к проектируемой системе и ее структурной схеме. Конструктор, используя свой опыт, умение, интуицию, результаты экспериментов и экспертные оценки создает (собирает) некоторый прототип требуемой системы.

Дедуктивный метод рассматривается как некоторый процесс последовательного построения проектных решений $R_i \in R$, в котором из задачи S_k формулируется определенное ограничение S_{k+1} и исходная информация A_{k+1} в решающей процедуре T_{k+1} последующего этапа. Каждое из промежуточных решений R_k задачи представляется основанием ветвящегося дерева вариантов. Дедуктивный метод требует создания совокупности математических моделей $M_i^S \in M$ объекта проектирования. Структура математических моделей зависит от уровня рассматриваемых свойств. Авторы работы [39] выделяют четыре уровня изучения свойств. Применительно к проектированию ЭВМ: 1) системных (архитектуры устройства), 2) алгоритмических (алгоритм функционирования), 3) логических (функциональная схема устройства), 4) конструктивных (монтажная схема).

В работе [39] находим и основные аксиомы системного проектирования.

Аксиома 1. Из неразрешимости общей задачи проектирования вытекает необходимость ее декомпозиции на совокупность локальных задач, упорядоченных многоуровневой параллельно-последовательной логической схемой проектирования.

Аксиома 2. Из неопределенности исходных данных и ограничений в общей задаче проектирования вытекает необходимость их прогнозирования и обмена проектными решениями между функциональными ячейками системы проектирования в соответствии с определенной логической схемой.

Аксиома 3. Из логической противоречивости общей задачи проектирования вытекает необходимость организации итерационных циклов, которые определяют сходимость системных решающих процедур.

Аксиома 4. Из невозможности сконструировать априори «сквозное» правило предпочтения следует необходимость «индивидуального» построения многоуровневого критерия оценки проектных решений, который может быть получен эвристически только в конце итерационного цикла (не раньше осуществления первой итерации).

В работе [39] основным эргатическим принципом системного проектирования называется обязательное сочетание формально логических элементов в решающих процедурах с неформализованными. Если системное описание будем считать первым отличительным свойством современного проектирования, то вторым — следует назвать оптимальность. В работе [3] комплексный опти-

мизационный подход формулируется следующим образом. В процессе проектирования выделяются по возможности все ситуации, связанные с выбором наилучшего проектно-конструктивного решения и для каждой ситуации решается задача определения оптимального решения, причем в процессе постановки таких задач стремятся максимально расширить множество решений. Рассматриваются три уровня оптимизации: 1) принципа действия технической системы (ТС), 2) структуры ТС, 3) параметров ТС. Наибольший эффект приносит оптимизация на первом уровне, но для этого уровня нет хорошо организованных методов и алгоритмов; наименьший эффект — на третьем уровне, но здесь есть хорошо отработанные методы.

В работе [55] отмечается, что задачи повышения качества машин следует решать на стадии проектирования, когда возможно оптимизировать структуру, кинематику, динамику, эксплуатационные свойства. В качестве основной проблемы оптимизационного проектирования выступает многокритериальность с противоречивыми целевыми функциями. Одним из наиболее удачных методов решения этой проблемы назван метод последовательных испытаний в многомерном пространстве параметров, часто называемый в литературе методом Соболя — Статникова. На основе этого метода конструктор получает возможность поставить задачу многокритериальной оптимизации, учитывая одновременно множество противоречивых критериев. Развитие методов проектирования неуклонно ведет к формализации все большего числа процедур и операций. Все шире используются вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем [31].

Системный подход, многокритериальная оптимизация и вычислительные методы выполнения проектных процедур и операций составили основу для автоматизации проектирования. Анализ исторического развития методов проектирования позволяет сделать следующие выводы:

- 1) научно-технический прогресс в области машиностроения всегда характеризовался опережением развития объектов техники по сравнению с методами их создания;

- 2) традиционные методы проектирования во многом опираются на такие человеческие свойства, как интуиция и воображение, описать и проанализировать которые пока не удалось;

- 3) традиционное проектирование не способно обеспечить кардинального сокращения сроков разработки и повышения качества объектов;

- 4) во второй половине нынешнего столетия широко развернулись исследования эвристических методов, создается общая теория проектирования;

- 5) основными чертами современной методики являются системность и оптимизационность, широкое использование вычислительных методов выполнения проектных операций и процедур;

6) современный этап развития методов проектирования связан с автоматизацией, подразумевающей широкое использование ЭВМ в актах принятия проектных решений.

1.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Не станем давать определение искусственному интеллекту. Сформулировать его сложно даже специалистам в этой области знаний. Укажем лишь на то, что создание искусственного интеллекта связано с разработкой кибернетических моделей интеллектуальной деятельности. Посмотрим, какие же достижения в этой области знаний уже сейчас могут быть полезны для методики проектирования.

Проектированием или предварительным описанием будущего объекта, как предмета труда, человечество занимается со времени начала его познавательной деятельности. Если несколько расширить понятие проектирования, включив в него и выбор тех или иных действий, то можно утверждать — каждый человек занимается им ежедневно и не один раз. Широта использования такого поведенческого акта не остается без внимания специалистов, занимающихся разработкой искусственного интеллекта. Ими уже выделены некоторые процедуры, сопровождающие планирование и другие близкие к проектированию процессы.

Автоматизация призвана не только освободить человека от «бездумной» работы, но оказать ему помощь и там, где проявляется его сознательная деятельность. В этой связи достижения в области искусственного интеллекта могут быть весьма полезны и для САПР.

Среди всех операций проектирования можно выделить широкий класс алгоритмических операций, для которых уже созданы или могут быть созданы формальные модели. К ним относятся все расчеты, выполненные по стандартам: расчет деталей машины на прочность, надежность, а также кинематический и динамический анализ. Сюда же можно отнести и расчеты по частным методам: расчет корпуса судна, усилий резания землеройными машинами и т. д. Однако алгоритмические операции и процедуры составляют лишь часть процесса проектирования. Кроме них, в нем применяются и эвристические операции и процедуры, отличающиеся от алгоритмических неопределенностью в постановке задачи, методе решения и в окончательном результате. К таким процедурам можно отнести, например поиск вариантов технических решений и выбор из них оптимального. Эвристические процедуры чаще выполняются человеком, но могут быть реализованы и на ЭВМ по так называемым эвристическим программам.

Все процедуры по области их использования можно разделить на специальные, общетехнические и применяемые в любой области человеческой деятельности. Третий тип процедур по со-

держанию можно отнести к метапроцедурам, играющим немало-важную роль при создании систем искусственного интеллекта. Остановимся на некоторых из них. Начнем с декомпозиции. Она означает разделение задачи на подзадачи. В практике проектирования эта метапроцедура уже используется давно. Основная задача проектирования (разработка проектной документации, необходимой и достаточной для изготовления объекта) разбивается на подзадачи, составляющие стадии разработки: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая документация. Каждая стадия разработки связана с определенным этапом проектирования.

Развитие методики приводит к дальнейшей декомпозиции задач, теперь уже на отдельных этапах. Декомпозиция способствует тому, что на определенной ее ступени задачи переходят в разряд алгоритмических. В этой связи уместно отметить одно из направлений изучения работы мозга, а именно: изучение алгоритмов мыслительной деятельности.

Другой, не менее важной для проектирования метапроцедурой, можно считать целенаправленный поиск в лабиринте возможностей. Под лабиринтом возможностей с позиций проектирования следует понимать возможные варианты технических решений. Целенаправленный поиск должен сократить путь в лабиринте к достижению поставленной цели. Одной из реализаций этой метапроцедуры в области разработки систем искусственного интеллекта является «Общий решатель задач», предложенный А. Ньюэллом, Дж. Шоу и Г. Саймоном. В названии подчеркивается универсальность процедуры. Авторы полагали, что «Общий решатель задач» сможет справиться с любой задачей, если начальные условия и цели будут сформулированы на доступном ему языке. «Общий решатель задач» по своей постановке сводится к следующему. Имеется множество различных объектов (x_i) и к ним можно применить n различных преобразований d_j . Если к объекту x_i применено преобразование d_j , то в результате образуется новый объект x_h , в частном случае совпадающий с исходным. На множестве объектов введено понятие различия, образующее множество $\{r_1, r_2, \dots, r_q\}$. Для каждой пары объектов (x_i, x_h) можно установить какими различиями они обладают. Работа программы «Общего решателя задач» состоит в выборе исходного объекта x_i , применении к нему случайным образом выбранного преобразования и сравнении полученного объекта с целевым, заранее заданным своими признаками. Если между этими объектами различий нет, то задача решена, в противном случае применяется новое преобразование из числа тех, которые способны устранить имеющиеся различия. Основным инструментом «Общего решателя задач» можно считать таблицу различий. Она содержит столько столбцов, сколько выделено различий между объектом, и столько строк, сколько предусмотрено преобразований. Ячейки на пересечении строк и столбцов помечаются.

Например, + означает, что соответствующее преобразование способно устранить (уменьшить) различия между целевым объектом и рассматриваемым.

Небезынтересна для методики проектирования и метапроцедура построения лабиринта. Она заключается в следующем. Каждое решение находится в определенном лабиринте возможностей. Если же в нем не отыскивается нужного варианта, то строится новый лабиринт. Так, если при разработке технического решения внутри определенной области, характеризующейся принципом действия, не находят удовлетворительного варианта, то переходят в другую область принципов действия, в новый лабиринт, и там отыскивают решение.

Заслуживает интерес и направление работ, называемое «семиотическим моделированием» [33]. В память ЭВМ в форме базы данных закладываются основные понятия и конструкции из них, используемые в процессе проектирования, создавая тем самым базу знаний. Семиотические программы должны реализовать специальную систему управления комплектом фиксированных знаний и обеспечить возможность логического вывода. В основу разработки таких программ может быть положена гипотеза о наличии в каждой области интеллектуальной деятельности некоторых инвариантных структур, называемых фреймами. Если фрейм наполнить конкретными объектами, то образуется определенная композиция. Казалось бы, что такой путь наиболее близок к автоматизации процессов проектирования. Однако на нем возникло большое препятствие — как вскрыть фреймы? Как найти наиболее оптимальный из них?

Трудности моделирования интеллектуальной деятельности породили среди некоторых специалистов сомнения в возможности использования ЭВМ на начальных творческих этапах проектирования. И это не без оснований. Не приведет ли формализация к сужению области поиска вариантов технических решений? Сможет ли ЭВМ создавать технические решения на уровне крупных изобретений?

Опираясь на мнение специалистов в области искусственного интеллекта [22], можно утверждать, что программы, построенные на основе уже разработанных методов, способны создать технические решения на уровне подавляющего большинства зарегистрированных изобретений, лишь совершенствующих известное устройство, способы или вещество.

Современные достижения в теории проектирования за рубежом связывают с исследованием человеческого интеллекта и с построением его математической модели. Рассмотрим подход к проектированию по работе [63], в которой введены следующие определения (Д), аксиомы (А) и теоремы (Т).

Д1. Множество объектов, включающее все объекты как элементы.

Д2. Элемент определяющего признака и его значения. Определяющим признаком объекта называется совокупность его свойств (физических, химических, механических, геометрических и т. д.), наблюдаемых с помощью тех или иных средств. Каждый объект имеет совокупность значений элементов определяющего признака.

Д3. Поведение объекта соответствует условиям его обитания и называется видимой функцией. Для различных условий поведение различно.

Д4. Понятия, связанные с объектом проектирования, образуются в соответствии с его смысловыми характеристиками.

Используя основные определения, формулируем аксиомы, истинность которых подтверждается опытом и интуицией.

А1. Объект может быть распознан и описан с помощью опознавательных признаков (аксиома узнавания).

А2. Множество объектов и множество объект-понятий имеют взаимоднозначное соответствие (аксиома соответствия).

А3. Множество абстрактных понятий есть топология множества объектных понятий (аксиома действия).

Из этих аксиом выведен ряд теорем, относящихся к процессу проектирования. Строятся они из предположения, что понятийное пространство является непрерывным, т. е. оно имеет неограниченную емкость памяти. В реальном проектировании не располагают таким объемом памяти; поэтому реальный процесс проектирования может рассматриваться как аппроксимация идеального процесса, выполняемого «суперменом».

Относительно знаний супермена получены следующие теоремы.

Т1. Требование проекта — есть пересечение абстрактных понятий в функциональном пространстве.

Т2. Требование проекта — есть фильтр.

Т3. Решение проекта — пересечение абстрактных понятий в опознавательном пространстве.

Т4. Если проект возможен, то тождественное отображение из познавательного пространства (S, T^0) в функциональное (S, T^1) — непрерывно.

Т1 описывается уравнением

$$T'_R = T_1^1 \cap T_2^1 \cap T_3^1, \quad (1.1)$$

где T'_R — требование проекта; T_1^1, T_2^1, T_3^1 — абстрактные понятия в функциональном пространстве.

Множество, описываемое уравнением (1.1), не пустое. Теорема 3 означает, что решением проекта является какой-то элемент множества объектов, который отвечает T'_R , т. е.

$$T_s^0 = T_1^0 \cap T_2^0 \cap T_3^0,$$

где T_s^0 — решение проекта; T_1^0, T_2^0, T_3^0 — абстрактные понятия в опознавательном пространстве (причем $T_s^0 \subset T'_R$).

Если эти теоремы имеют силу, то гарантируется, что требование проекта в функциональном пространстве имеет соответствующее решение в опознавательном пространстве.

Процесс проектирования описывается T5, которая гласит, что детализируя требования проекта, мы получаем последовательность понятий объекта, которая сходится в одну точку множества объектов. Однако этот процесс может быть непрерывным только теоретически и реализован лишь суперменом. T6 утверждает, что процесс проектирования, описанный применительно к супермену, в реальности не срабатывает. Для проектирования в реальных условиях должно быть выполнено условие T7: при реальном знании проект возможен, если есть некоторое правило прямого соответствия между топологиями абстрактного понятия и опознавательного понятия без вмешательства понятия объекта.

Возможны два случая: 1) в топологическом пространстве точное соответствие известно; 2) известен метод нахождения направленных серий точек, которые будут сходиться в решение (первый случай называется случаем типа соответствия, второй — случаем типа сходимости; этим случаям соответствуют некоторые модели, обеспечивающие возможность выполнения проекта реальным проектировщиком).

Тип соответствия. 1. Модель соответствия один к одному (каталожная модель). Каждой спецификации требования в функциональном пространстве будет дано какое-то решение в опознавательном пространстве с точным соответствием. Проблема проектирования сводится к проблеме поиска данных. Это значит, что никакого артефакта не будет создано в ходе проектирования, который не существовал в прошлом. 2. Расчетная модель. Если допустить аппроксимацию в опознавательном пространстве, полагая множество элементов опознавательного признака конечным, и каждый элемент выразить числом, то возможно представить функцию от признаков. 3. Порождающая модель. Если существует ряд правил, которые создают решение в значениях опознавательного признака, давая спецификацию в значениях функции, то проект детерминирован порождающим правилом.

Тип сходимости. 4. Парадигматическая модель. Пусть имеется множество точек, отвечающих возможным решениям проекта. Точки эти называют парадигмами. Если есть правило, которое создает направленные серии точек, то можно утверждать, что выбор новой точки улучшает решение. Здесь выдвигаются две гипотезы.

Гипотеза 1. Чем больше подобия в функции объектов, тем больше подобия в опознавательных признаках.

Гипотеза 2. Объективное понятие у проектировщика имеет иерархическую структуру.

При этих предположениях проектировщик может предложить предварительное решение, которое удовлетворяет данной спецификации лишь частично. Подобие опознавательных признаков

измеряется степенью общности элементов, включенных в них. Следовательно, проектировщик будет пытаться изменить элемент опознавательного признака для того, чтобы изменить функцию.

Системы автоматизированного проектирования могут использовать все четыре модели. *Первая модель* пригодна как исходная процедура поиска готовых решений; *вторая модель* связана с заключительными стадиями проектирования, когда уже выбрана компоновка объекта, установлены связи между его элементами. Существуют два различных типа вычислений при проектировании: 1) расчет размеров для удовлетворения требований, предъявляемых к физическим свойствам компонент; 2) расчет размеров для компромиссного существования предметов в пространстве.

Первый тип вычислений выходит за рамки теории проектирования, относится к специальным дисциплинам и развит довольно хорошо. Второй тип представляет собой геометрическую задачу. В случае, когда рассматривается только один объект, она решается геометрическим моделированием. Типичным примером этого является: генерирование сложной формы по пересечениям нескольких простых и вычерчивание трехмерного изображения. С точки зрения объема вычислений эта задача очень трудоемка.

Третья модель — порождающая, была использована как база для создания САПР, которая помогает проектировщику на ранних стадиях проектирования. Процесс проектирования обычно начинается с описания функциональных требований. Функции, как правило, не описываются в математически обрабатываемых формах (они обычно выражаются на естественном языке). Например, «для нас требуется что-то, с помощью чего мы можем пить чай» — есть функциональное требование. У нас нет средств для манипулирования таким описанием в математической форме. Однако порождающие правила дают возможность отображать объект проектирования из функционального пространства в опознавательное. Для этого необходимо создать цепочку этих правил. Порождающие правила обычно описываются следующим образом: *IF* — если (условие), *Then* — тогда (действие). Например, «если подшипник, тогда малое трение». Это знание небольшого размера или один фрагмент знаний, которое касается упомянутого выше отображения. Проектировщик содержит подобные правила в своей долговременной памяти. Сведенные в систему в виде порождающей модели, они могут помочь в отображении функциональных требований в опознавательные признаки. В качестве иллюстрации показана система, использующая логику первого порядка вместо порождающих правил. Пусть проектировщик обладает базой знаний, содержащей следующие шесть правил:

- 1) $\forall x$ [имеет (цилиндр — дно, x) $\rightarrow$ содержит — воду (x)];
- 2) $\forall x$ [имеет (адсорбирующий — пористость, x) $\rightarrow$ содержит — воду (x)];
- 3) $\forall x$ [имеет (ручка, x) $\wedge$ легкий (x) $\rightarrow$ портативный (x)];

4) $\forall x$ [имеет (хорошая форма, x) $\wedge$ легкий (x) $\rightarrow$ портативный (x)];

5) применение — A — солома $\rightarrow$ легко пить;

6) применение — B — две ладони $\rightarrow$ легко пить.

От проектировщика требуется сконструировать что-то, из чего можно пить чай. Это требование можно выразить следующим образом:

7) $\exists x$ содержание — чай (x) $\wedge$ поративный (x) $\wedge$ легко пить (x)].

Пока первые шесть правил не дают возможности дедуктивного вывода. Правилам 5 и 6 следует придать предикатно-логическую форму. Так, методом индукции можно построить следующие знания:

5) $\forall x$ [имеет (трубка, x) $\rightarrow$ легко пить (x)];

6) $\forall x$ [имеет (гладкий — открытый край, x) $\rightarrow$ легко пить (x)].

Теперь становится возможным построить высказывание на основе требований 7 и базы знаний:

8) *IF* [содержание — чай (x)] *Then* [имеет (цилиндр — дно, x)];

9) *IF* [портативный (x)] *Then* [имеет (ручка, x) $\wedge$ легкий];

10) *IF* [легко пить (x)] *Then* [имеет (гладкий — открытый край, x)].

Порождающие правила 8, 9, 10 дают «проект» нужного нам объекта.

11) $\forall x$ [имеет (цилиндр — дно, x) $\wedge$ имеет (ручка, x) $\wedge$ легкий (x) $\wedge$ имеет (гладкий — открытый край, x)].

Это напоминает обычную чайную чашку. Но такое решение не единственно. Можно построить и выбор других порождающих правил:

12) *IF* [содержание — чай (x)] *Then* [имеет (абсорбирующий — пористость, x)];

13) *IF* [портативный (x)] *Then* [имеет (хорошая — форма, x) $\wedge$ легкий];

14) *IF* [легко пить (x)] *Then* [имеет (трубка, x)].

Новый «проект» теперь выглядит так:

15) $\forall x$ [имеет (абсорбирующий — пористость, x) $\wedge$ имеет (хорошая — форма, x) $\wedge$ легкая (x) $\wedge$ имеет (трубку, x)].

Пример показывает, что порождающие правила могут дать некоторое множество решений. Для выбора наилучшего из них следует добавить дополнительные требования. На основе порождающей модели разработана система автоматизированного проектирования *PROSCODE* (система порождающих правил для концептуального проектирования). На вход системы поступают требования, на выходе — схема из функциональных элементов.

На основе *четвертой модели* разработана другая система, предназначенная для детального проектирования. В этой модели проектировщик, имеющий ряд требований, предлагает

пробное решение путем выбора его из базы знаний. Далее исследуется функция пробного решения, и если оно имеет расхождение с исходными требованиями, то она модифицируется. Система, реализующая эту модель, названа *PRODIRE* (фреймовая система для интеграции проектирования с реляционной базой данных или «лягушка — собака — птица»).

Система снабжена основными фреймами так же, как база знаний. В случае проектирования машин фреймы представляют собой элементы машины, такие как подшипниковые узлы, суппорты, коробки передач и т. д. Каждый фрейм представляет один класс элементов конкретных машин.

1.4. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ В МАШИНОСТРОЕНИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Остановимся вначале на общих положениях системы автоматизированного проектирования. Комплекс средств автоматизации проектирования включает различные виды обеспечения: техническое, программное, информационное, лингвистическое, организационное, методическое, математическое. Технические средства делятся на следующие группы: подготовки и ввода данных, передачи данных, программной обработки данных, отображения и документирования данных, архива проектных решений. Группа подготовки и ввода предназначена для автоматизации подготовки и редактирования данных при вводе в ЭВМ различных видов алфавитно-цифровой и графической информации. Она должна предоставлять возможность кодирования информации, нанесения данных на машинные носители, ввода данных в ЭВМ, визуального контроля и редактирования данных при их вводе. В группу должны входить устройства подготовки и ввода графической информации и данных (предпочтительно с экранных пультов), магнитных и других современных видов носителей. Группа передачи данных предназначена для обеспечения дистанционной связи технических средств по телефонным, телеграфным и другим специальным каналам. Группа программной обработки данных строится на ЭВМ общего или специального назначения и должна предоставлять возможность проектирования и эксплуатации программного обеспечения, замены или наращивания ЭВМ одной и той же системы, учета времени работы, мультипрограммного и диалогового режимов работы. Группа отображения и документирования данных предназначена для оперативного представления проектировщику необходимых данных и документирования проектных решений. В группу должны входить устройства вывода информации на экран, бумагу, микрофильмы и микрофиши. Группа архива проектных решений обеспечивает хранение, контроль, восстановление и размножение данных о проектных решениях, а также справочных данных. В группе следует использо-

вать устройства автоматизированного доступа к микрофильмированным документам.

В системах автоматизированного проектирования могут использоваться как большие, малые, так и микроЭВМ. Большие ЭВМ серии ЕС (ЕС-1040, ЕС-1045, ЕС-1050 и др.) позволяют (благодаря большому объему оперативной памяти и быстродействию) решать задачи, требующие значительного объема вычислений. В последние годы появились и стали широко использоваться интеллектуальные терминалы, имеющие свой собственный мини-или микропроцессор и разветвленные периферийные устройства. Такие интеллектуальные терминалы (их часто называют абонентскими пунктами) помимо ввода—вывода способны выполнять и обработку данных. Интеллектуальный терминал обеспечивает индивидуальное пользование и ориентирован, как правило, на конкретную область применения, а самое главное, он разгружает центральную ЭВМ от редактирования и преобразования символьных текстов и графических данных.

Развитие интеллектуальных терминалов привело к созданию автоматизированных рабочих мест (АРМ) конструктора на базе мини- и микроЭВМ. Отечественная промышленность выпускает комплекты АРМ, включающие: ЭВМ (СМ-1420, СМ-1600, СМ-1800, СМ-1810, СМ-1700), накопители на магнитных дисках и на магнитной ленте, устройства ввода—вывода с перфоленты и с перфокарт, алфавитно-цифровой дисплей, графопостроитель, кодирующей графической информации, алфавитно-цифровое печатающее устройство, устройство связи с ЭВМ верхнего уровня.

Программное обеспечение составляет совокупность машинных программ, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. Оно строится, как правило, на базе программного обеспечения ЭВМ, организованного в виде операционной системы (ОС ЭВМ). В настоящее время существует несколько ОС ЭВМ: ОС ЕС и ДОС ЕС для ЭВМ серии ЕС; ОС РВ, ДОС, РАФОС и другие для мини-ЭВМ.

Основные функции ОС ЭВМ: максимальная загрузка оборудования, управление заданиями, задачами и данными.

На первых этапах автоматизации проектирования обходились средствами ОС ЭВМ. В дальнейшем стали создаваться библиотеки прикладных программ для решения отдельных задач проектирования и пакеты прикладных программ (ППП), представляющие совокупность машинных программ, необходимых для выполнения какой-либо проектной процедуры. В настоящее время разрабатываются программы, управляющие процессом проектирования. В совокупности с ОС ЭВМ они образуют операционную систему автоматизированного проектирования.

Математическое обеспечение составляет совокупность математических методов моделей и алгоритмов проектирования. По существу оно оказывается основой для разработки программного обеспечения. Математический метод определяет постановку

и способ решения конкретной задачи проектирования. Совокупность методов составляет методику проектирования.

Математическая модель представляет условия задачи в виде уравнений и неравенств. Алгоритм образует совокупность предписаний для решения задачи. Лингвистическое обеспечение объединяет языковые средства проектирования: термины и определения, правила формализации естественного языка, методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования.

Язык проектирования образуют символы и правила построения из них описаний объекта проектирования. Различают входной, базовый и выходной языки. Входной предназначен для представления задания на проектирование, базовый — для дополнительных сведений к первичному описанию объекта проектирования, проектных решений, описаний проектных процедур (в том числе и процедур информационного обмена) и их последовательности. Выходной язык представляет проектное решение в форме, удовлетворяющей требованиям его дальнейшего применения.

На первых этапах автоматизированного проектирования довольствовались тем или иным языком программирования, предоставляемым операционной системой ЭВМ. Для автоматизированного проектирования чаще используется ФОРТРАН. В дальнейшем стали создаваться специальные языки и среди них язык представления графической и текстовой информации (ЯГТИ). ЯГТИ используется для описания геометрических и текстовых данных об объекте проектирования независимо от устройств хранения этого описания. По мере развития автоматизированного проектирования создаются языки диалога человека с ЭВМ. Со временем они будут приближаться к обычному разговорному языку и передаваться в форме речи.

Выходной язык в том случае, если процесс проектирования завершается разработкой чертежей и текстовой документации, должен соответствовать требованиям ЕСКД. Иначе обстоит дело, если информация с АРМ передается на автоматизированное предприятие. В этом случае в качестве выходного языка можно использовать ЯГТИ.

Методическое обеспечение является основным по отношению ко всем остальным. Но, несмотря на исключительную важность, оно еще не получило должного развития. По своему содержанию методическое обеспечение выходит за рамки других и представляет самостоятельную задачу, примыкающую к научной дисциплине, способной организовать ее разрешимость. Такая дисциплина только создается. Она не получила пока общепринятого наименования. Одни называют ее теорией проектирования, другие — основами проектирования, третьи — методологией проектирования.

Информационное обеспечение составляет совокупность сведений, необходимых для выполнения автоматизированного проек-

тирования; к их числу можно отнести: научные статьи о перспективах развития техники, прогнозы, исследования, авторские свидетельства и патенты, законченные проектные разработки, стандарты, нормативы, т. е. все то, что должен знать конструктор, разрабатывая объекты новой техники, и чем он должен руководствоваться в процессе проектирования. Все необходимые сведения образуют фонд информации. На его основе строятся структурные модели объектов информации, преобразуемые затем в знаковые модели. Последние формируются на машинных носителях в виде информационных массивов.

Фонд информации создается на основе анализа процесса проектирования (в ходе его автоматизации) и в дальнейшем пополняется. Он, как правило, состоит из трех видов информации: оперативной, условно-постоянной и постоянной.

Оперативная информация формируется применительно к конкретной задаче и в ЭВМ не хранится. Условно-постоянная является частью сведений, подлежащих хранению с периодическим обновлением. К такому виду информации можно отнести, например, Государственные и отраслевые стандарты, чертежи изделий, технические требования на изделия, прейскуранты и др. Постоянная информация подлежит хранению без изменения. К ней можно отнести, например, сведения о структурных и знаковых моделях информационных объектов и др.

До недавнего времени информационные массивы представлялись в форматах, ориентированных на конкретные обрабатывающие их программы. С ростом информационных массивов это приводило к дублированию, а нередко и к противоречию.

В настоящее время информационное обеспечение автоматизированного проектирования ориентировано на базы данных (БД), которые обеспечивают ведение информационных массивов и внесение в них изменений независимо от прикладных программ. Это достигается двумя видами организации БД: логической и физической.

Логическая организация представляет данные и связи между ними в виде логической структуры и предназначена для прикладных программистов (пользователей). Физическая организация означает физическую структуру размещения данных на внешних носителях. Связь между логической и физической структурами осуществляют специальные программы, входящие в систему управления базой данных (СУБД), которая по своему назначению близка к операционной системе ЭВМ и обеспечивает выполнение операций управления: создания базы данных, ввода и размещения данных в базе, хранения данных, поиска и вывода данных из базы, реструктуризации базы, означающей преобразование этой базы в новую в соответствии с заданными условиями.

Организационное обеспечение объединяет документы, устанавливающие структуру проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции, а также форму предста-

вления результата проектирования и порядок рассмотрения проектных документов, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. Совокупность различных видов обеспечения образует комплекс средств автоматизации проектирования.

Организационно-техническая система, объединяющая комплекс средств автоматизации проектирования и необходимые подразделения проектной организации (пользователей) называется «Системой автоматизированного проектирования» (САПР). Подсистемы САПР разделяются на два вида: проектирующие и обслуживающие.

Проектирующие подсистемы выполняют основные проектные процедуры и операции, т. е. обеспечивают преобразование описаний объекта проектирования, а обслуживающие — представляют описание в виде отдельных документов и обеспечивают хранение, поиск и передачу информации от одной проектной процедуры (операции) к другой; эти подсистемы могут быть общего назначения и проблемно-ориентированные. Первые применимы в любой области техники, вторые ориентированы на конкретные объекты.

В настоящее время в области САПР заметное место занимают системы, объединяющие технические средства в виде АРМ с базовым программным обеспечением и пакетом прикладных программ. К их числу относится, например, АРМ «Автограф-840» для конструкторских и технологических работ в машиностроении и металлообработке. Оно обеспечивает разработку в интерактивном режиме: конструкций изделий машиностроения в виде графической и текстовой документации, технологической документации, программ для станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

«Автограф-840» построен по агрегатно-модульному принципу, а его технические и программные интерфейсы соответствуют международным стандартам СМ ЭВМ. В состав комплекса технических средств входят: центральная ЭВМ СМ-1810 (могут быть использованы и другие модели: СМ-1420, -1700, -1800), графический дисплей «Автограф-841», «Автограф-842» — устройство вывода на печать текстовой и графической информации с экрана дисплея, графопостроитель планшетного типа «Микроника-297», «Автограф-843» — устройство для преобразования графической информации в цифровую, растровое печатающее устройство СМП-6320.

Графический дисплей «Автограф-841» в алфавитно-цифровом режиме используется в качестве консоли центральной ЭВМ (размер экрана по диагонали 40 см, графическая емкость 512×512 точек, две страницы памяти и два независимых процессора с каналами связи).

Устройство вывода на печать текстовой и графической информации с экрана дисплея «Автограф-842» позволяет получать твер-

дую копию на бумажной ленте шириной до 300 мм с набором символов из 158 знаков (прописные и строчные буквы латинского и русского алфавита, цифры и специальные знаки). Синтезирование печатных символов выполняется в матрице 9×8 точек.

Графопостроитель планшетный «Микроника-297» имеет размеры рабочего поля 300×420 мм, 8 пишущих элементов, разрешающую способность 0,1 мм, масштаб изображения от 2 : 1 до 1 : 10.

«Автограф-843» предназначен для ввода в ЭВМ координат точек чертежей, а также координат поля дополнительной информации (размер поля кодируемого чертежа 420×300 мм, размер поля дополнительной информации 420×120 мм, разрешающая способность 0,2 мм, погрешность считывания координат $\pm 0,5$ мм).

Растровое печатающее устройство СМП-6320 предназначено для вывода алфавитно-цифровой и графической информации на бумагу с краевой перфорацией. Дополнительно по команде ЭВМ устройство может удваивать высоту символов в строке. В режиме графопостроителя устройство производит одновременный вывод графической информации по всей ширине зоны печати, составляющей 337 мм, с шагом точек растра по горизонтали 0,212 мм и по вертикали 0,355 мм.

Базовое программное обеспечение включает помимо операционной системы интерактивную графическую библиотеку «Автограф-844», пакет прикладных программ для конструирования изделий машиностроения «Автограф-845» и пакет прикладных программ для разработки технологической документации «Автограф-846». Базовая интерактивная графическая библиотека содержит программы, написанные на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV, позволяющие: вычерчивать координатные оси, графические примитивы (точки, отрезки прямых, окружности и др.), буквы и цифры; трансформировать фигуры (прямоугольники, окружности, ломаные) путем переноса, поворота, масштабирования, аффинных преобразований, а также путем прямого использования матрицы преобразования; объединять элементарные чертежи в сложный.

Пакет прикладных программ «Автограф-845» выполняет следующие функции двумерной графики: управление чертежом (масштабирование, увеличение части чертежа, сдвиг изображения, стирание всего чертежа или его элементов, работа с библиотекой, управление параметрами линий и текста и т. д.); построение графических элементов (точек, отрезков, прямых линий, дуг или окружностей), а также формирование закруглений и фасок, построение отверстий или вала, перемещение элементов чертежа, вращение, симметрия и т. д.; обозначение графических элементов; нанесение размеров; штриховку заданных областей. Этот пакет создан на основе пакета *DAMEKA* фирмы *ADEPA*. В процессе работы с ним для выбора той или иной функции пользователю в удобной форме представляется меню.

Пакет прикладных программ для разработки технологической документации «Автограф-846» обеспечивает в интерактивном режиме автоматизированное формирование и выпуск основных технических документов. После включения в архив на магнитных носителях типовых технологических процессов, пользователь имеет возможность с помощью многофункциональной специализированной программы — редактора создавать технологическую документацию на новые изделия, «перекраивая» уже существующие документы, извлеченные из архива, и относящиеся к процессам — аналогам, добавляя или исключая операции и переходы, корректируя размерные характеристики.

В практике проектирования уже используются многие подсистемы САПР. Особенное развитие они получили в авиации, судостроении, автомобилестроении, станкостроении. В нашей стране в целях централизации снабжения проектных организаций программными средствами создан специализированный фонд, хранящийся в научно-производственном объединении «Центр программсистем» (г. Калинин).

Дать полный перечень существующих подсистем невозможно, приведем лишь примеры. Начнем с обслуживающих подсистем. Это, например, «Адаптивная информационная система» (СУБД АИСТ), ориентированная на обработку больших объемов данных сложных структур, функционирующая под управлением операционной системы ЕС ЭВМ; интерактивная информационно-поисковая система «ПОИСК-1, -2», обеспечивающая автоматическое создание (без ручного индексирования документов), расширение и поддержку информационных баз и доступ к документам при поиске; «Система управления базами данных сетевой структуры» (СУБД «СЕТОР»), ориентированная на ЭВМ серии ЕС, а также СУБД «СЕТОР—СМ» и СУБД «МИКРОСЕТОР» для ЭВМ серии СМ. В общей сложности только на базе средних и больших ЭВМ действует в настоящее время свыше 20 СУБД.

Из подсистем машинной графики можно назвать: комплекс программ ГРАФОР, используемый в качестве программного обеспечения АРМ; систему интерактивной графики (СИГ) для работы с графическим дисплеем «ЭПГ-СМ» под управлением ОС РВ; систему графического обеспечения АРМ конструктора изделий машиностроения (АРМ-М/РАФОС); систему организации обмена графической информацией и доступа к графическому оборудованию (*UNIGRAF*) и др.

Большую группу составляют подсистемы научно-технических расчетов. Часть из них входит в программное обеспечение ЭВМ, другие разработаны в дополнение к нему. К последним можно отнести, например, пакет прикладных программ (ППП) «Градиент», предназначенный для анализа нелинейных математических моделей; ППП методов численного анализа, расширяющий библиотеку программ пользователя на ФОРТРАНЕ; ППП для

научно-технических расчетов; ППП «Обработка данных методами математической статистики» и др.

Многочисленны и проектирующие подсистемы как общего назначения, так и проблемно-ориентированные. Назовем только некоторые из подсистем общего назначения: программные комплексы ПРИНН-1, -2, -3, рассчитанные на многовариантный выбор решений; система формирования алгоритмов конструкторско-инженерных расчетов (ФАКИР), предназначенная для автоматизации построения алгоритмов и программ решения задач проектирования сложных объектов машиностроения; ППП *ALIS* и *PLIMO* для автоматизированного имитационного моделирования детерминированных и случайных колебаний многомерных механических систем; операционная система эргономического проектирования человеко-машинных систем; ППП для расчетов цилиндрических зубчатых передач и многие другие. Еще более многочисленны подсистемы технологической подготовки производства.

В настоящее время ведутся работы и по созданию специальных операционных систем САПР (ОС САПР), объединяющих проектирующие и обслуживающие подсистемы, а также подсистемы диалога для организации интерактивного взаимодействия пользователей с ЭВМ на этапах выполнения проектных процедур.

К средствам создания операционных систем САПР можно отнести инструментальный диалоговый монитор (ИДМ) «ФАУСТ» [48], который позволяет: создавать, модифицировать, просматривать и документировать символические тексты; вести (обслуживать) символические библиотеки; вызывать обрабатывающие программы ОС (трансляторы, загрузчики, редактор связей, утилиты); пополнять и использовать библиотеки загрузочных модулей; создавать, модифицировать и использовать оперативный банк числовых данных; управлять процессом подготовки исходных данных для вычислительной задачи; вызывать для выполнения предметные программные модули САПР; просматривать листинги обрабатываемых программ ОС и предметных задач; управлять форматом просмотра и документирования результатов работы предметных задач; использовать специальный язык организации диалога (ЯОД) для создания предметно-диалоговой САПР, использующей все перечисленные выше возможности ИДМ; вводить через ИДМ любые команды оператора.

Ряд НИИ и КБ машиностроительных отраслей разрабатывают систему комплексной автоматизации проектирования, разработки и изготовления изделий «КАПРИ», которая должна выполнять: автоматизированное конструирование типовых сборочных узлов, типовых и оригинальных деталей (информационное обеспечение процесса конструирования, проведение расчетов, подготовка текстовой документации и при необходимости получение чертежей);

автоматизированное проектирование технологии (информационное обеспечение, выбор заготовок, формирование маршрутной и операционной технологии, расчет режимов обработки, выбор или конструирование инструмента, выработка управляющей программы для станков с ЧПУ);

автоматизированное управление технологическими процессами (автоматическая передача управляющей программы на станки с ЧПУ, контроль технологических параметров, активный контроль размеров детали в процессе обработки, контроль состояния оборудования, учет текущего состояния производства, слежение за прохождением деталей технологического маршрута, управление транспортно-складским комплексом);

организационно-экономическое управление (техничко-экономическое и оперативное планирование производства и его учет, материально-техническое обеспечение, оперативно-диспетчерское управление).

Техническое обеспечение системы КАПРИ строится на базе многомашинного вычислительного комплекса, в состав которого входят: ЭВМ ЕС-1045, СМ-4 и микроЭВМ «Электроника-60», «Электроника НЦ-31», -80, алфавитно-цифровые и графические дисплеи, устройства печати, накопители информации на магнитных дисках.

Проектирующие подсистемы, применяемые к конкретным объектам, часто называют объектно-ориентированными. Подобные подсистемы настолько многочисленны, что затруднительно привести даже их перечень. Остановимся для примера на подсистеме, связанной с проектированием гидропривода и названной САПР «Гидрооборудование», сданной в промышленную эксплуатацию во ВНИИгидропривода [46]. Ее структурная схема приведена на рис. 1.5. Блок управления представляет собой управляющую программу (УП), обеспечивающую связь системы с пользователями, базой данных и блоком оптимизации. Работа УП начинается с обращения к блоку, содержащему базу данных. Устройством связи с оператором выдается список объектов проектирования, запрашивается код объекта, из базы данных выбирается модель, соответствующая указанному коду. Далее УП запрашивает дополнительную информацию, уточняющую модель, критерий эффективности, ограничения. Сформировав математическую модель, УП обращается к блоку оптимизации, сообщая пользователю список методов оптимального поиска. Пользователь указывает код метода оптимизации. В блок оптимизации включены методы: Лагранжа, Шора, модифицированных функций Лагранжа с численным дифференцированием, Лагранжа—Мида, градиентный. Полученные по одному из указанных методов оптимизации параметры объекта выдаются УП в виде таблицы. Пользователь оценивает результаты и принимает решение о продолжении или окончании работы с системой. При необходимости могут быть уточнены математическая модель и исходная информация, выбран иной метод оптимизации.

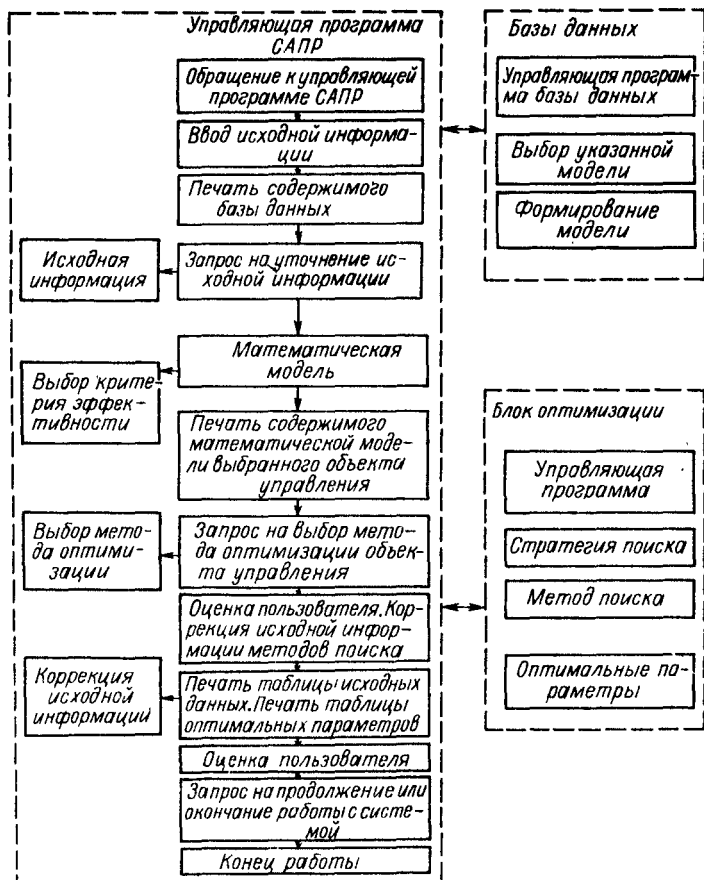


Рис. 1.5. Структурная схема подсистемы САПР «Гидрооборудование»

Развитие САПР за рубежом идет высокими темпами [45]. В США к настоящему времени более половины машиностроительных изделий проектируются с помощью ЭВМ. В общей сложности действует более 200 систем автоматизированного проектирования, отличающихся производительностью, программными и техническими средствами, способностью объединения с другими системами. Для технического обеспечения все чаще используются автоматизированные рабочие места на основе микропроцессорной техники, цветные графические дисплеи и накопители на винчестерских дисках; повышается разрешающая способность дисплеев, растет число цифровых преобразователей, совершенствуются устройства управления курсоров, речевого ввода информации. Функциональные возможности систем расширяются за счет интеграции автоматизированного проектирования и подготовки производства (CAD/CAM).

До недавнего времени западноевропейские страны заметно отставали от США и Японии в разработке САПР [46]. Однако в последнее время началась в этом направлении разработка ряда программ научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Европейское экономическое сообщество поддержало рассчитанную на 5 лет программу, названную *Esprii*, стоимостью 840 млн ф. ст. Эта программа разрабатывается рядом крупных фирм Великобритании, Франции, ФРГ, Италии. Государственные учреждения этих стран взяли на себя 50 % всех затрат. В каждой из европейских стран действуют собственные национальные программы.

Из главных достижений современных САПР следует отметить успехи в области интерактивной машинной графики. Это прежде всего автоматизация выполнения чертежей. При этом пока сохраняются традиционные методы, с той лишь разницей, что компоновка чертежа выполняется с использованием графического терминала (дисплея) и операторского устройства ввода, с последующим получением твердой копии чертежа на графопостроителе.

Повышение качества графической документации и сокращение сроков ее создания достигается за счет целого ряда услуг, предоставляемых конструктору системой. Прежде всего это удобство поиска аналога. Ранее выполненные разработки, типовые конструкции, стандартные изделия могут храниться в архиве на магнитных носителях и вызываться на экран терминала по специально организованному запросу конструктора. В полученное изображение при необходимости вносятся изменения; убираются некоторые его части или вносятся новые.

Ускорение построения чертежа достигается использованием операции симметрии, когда конструктор изображает лишь половину детали, а машина автоматически дополняет вторую половину. Однотипные изображения могут выводиться на экран одновременно (в местах, определенных подаваемой командой). Системе можно поручить вычислить и построить сопряжения элементов чертежа, выполнить штриховку, нанести размеры, оформить чертеж основными надписями. Возможно послойное изображение сложных чертежей с последующим совмещением слоев. Для наглядности изображения могут быть представлены в разном цвете.

По мнению специалистов, использующих интерактивную машинную графику, продолжительность изготовления чертежей в зависимости от их сложности сокращается в 2—10 раз. Возможности современной интерактивной машинной графики не ограничиваются автоматизацией выпуска чертежей в двумерном изображении. Большую помощь конструктору оказывает геометрическое трехмерное моделирование. Оно дает наглядное представление об изделии, позволяет получать новую информацию о нем. Использование раскраски поверхностей объемного изобра-

жения создает имитацию реальных изделий. Возможно «оживление» изображения машинной мультипликацией.

Перечисленные и некоторые другие возможности предоставляет, например, система «Аутокад», использующая технические средства фирмы IBM модели XT или AT. Система уже эксплуатируется в некоторых организациях нашей страны.

Несмотря на несомненные успехи автоматизации в проектировании, как показал анализ [65], еще нельзя говорить о коренной перестройке. Для этого потребуются: проведение предварительного анализа деятельности конструкторов, состава выпускаемой чертежной и текстовой документации; определение доли поискового вариантного конструирования, степени алгоритмизации труда, анализа затрат, уровня унификации и стандартизации. Высказывается мнение, что современные системы автоматизированного проектирования еще не полностью реализуют потенциальные возможности обеспечивающих их технических средств [62]. Работа с некоторыми из них лишает конструктора инициативы, утомляет его.

Основные трудности освоения САПР [66] состоят в большой стоимости аппаратных и программных средств, в необходимости обучения персонала и реорганизации кадров. Оптимистические прогнозы относительно возможностей автоматизации проектирования пока не оправдались. Однако в настоящее время заметен переход к новому поколению автоматизированных систем, в основе которых лежат достижения в области искусственного интеллекта и, в частности, баз знаний. Таким образом, несмотря на определенные успехи в развитии САПР, кардинального изменения в практику проектирования они не внесли. Недостатки существующих САПР коренятся в том, что они создаются в рамках традиционного проектирования, допускающего формализацию и использование ЭВМ лишь на последних стадиях проектирования. Успехи автоматизации в большей степени затрагивают обслуживающие подсистемы, нежели проектирующие. Работы в области САПР были бы более результативны, если бы ее разработчики имели формализованное описание проектных процедур и операций. Однако в этом-то и состоит основная сложность. Только дальнейшие методологические исследования, достижения в области искусственного интеллекта позволят вскрыть механизмы творчества, создать методы автоматизированного проектирования, не уступающие по оригинальности принимаемых решений и превосходящие традиционные по срокам разработки и качеству проектируемых объектов.

Теория проектирования не развивается сама по себе. Ее питают многие научные направления: и старые, и сравнительно новые. К последним можно отнести системотехнику, кибернетику, теорию принятия решений, квалиметрию, эргономику и художественное конструирование, инженерное прогнозирование, теорию экстремальных задач. Главное же методологическое средство познания процесса проектирования можно искать в марксистско-ленинской теории познания.

Глава 2. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

2.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ ПОЗНАНИЯ

Проектирование — есть форма познания объективного мира. Однако оно имеет ряд специфических черт. Для раскрытия сущности проектирования необходимо остановиться на таких категориях: как субъект и объект проектирования, воображение и интуиция, познавательный образ, ценность и оценка. Нужно вскрыть творческие начала в процессе проектирования и возможность формализации его приемов. Особое внимание следует уделить эвристической роли знаков.

Марксистско-ленинская теория познания в философской литературе освещена весьма широко. Однако проектированию, как весьма специфической его форме, уделено явно недостаточно внимания. Несомненно, рассматривать проектирование следует не только с позиций философии, но и с позиции других наук, таких, например, как психология, системотехника, кибернетика, логика и др. Тем не менее теория познания дает возможность вскрыть наиболее общие законы процесса проектирования.

Субъект проектирования. Под субъектом проектирования можно понимать отдельного человека, коллектив специалистов, искусственный интеллект. По аналогии с субъектом познания [26] субъект проектирования — система, осуществляющая извлечение информации о внешних явлениях природы и общественной жизни, включая процесс коммуникации в широком смысле слова (передача сведений в ходе обучения, обмен мнений, борьба идей и т. д.).

Подход к субъекту проектирования, как к системе, обусловлен наличием в нем всех ее атрибутов. Действительно, проектирование состоит в одновременном и последовательном выполнении некоторых процедур и операций, начиная с формирования задачи проектирования до разработки рабочей документации. Каждая процедура имеет собственную цель, вытекающую из общей цели и являющуюся ее частью. Выполнение той или иной процедуры, независимо от того, участвует в проектировании один человек или целый коллектив, начинается и завершается по определенной команде. Таким образом, формируется система, имеющая цель функционирования, иерархическую структуру и управление. Средством функционирования этой системы является информация о результатах выполненных процедур и операций. Показателем эффективности системы можно считать качество создаваемого объекта.

Объект проектирования. Основная отличительная особенность проектирования от познания вообще состоит в том, что объект проектирования, в отличие от объекта познания, еще не существует, однако его образ воспринимается субъектом как реальный,

с присущими ему внутренней динамичностью и противоречивостью. Современные объекты проектирования выступают как сложные системы с большим количеством взаимосвязанных подсистем и элементов. Объект проектирования в сознании субъекта должен существовать в определенном окружении, взаимосвязь с которым и характеризует его жизнедеятельность. Современный стиль мышления, и это в полной мере относится к субъекту проектирования, — это системный и кибернетический. Не надо полагать, что он возник сам по себе в отрыве от развития философии, логики. Системный и кибернетический стиль мышления на самом деле является воплощением принципов и средств диалектической логики. Нормы и правила системного мышления разработаны в трудах В. И. Ленина. В. И. Ленин характеризует условия действительного познания объекта. Во-первых, надо охватить, изучить все его стороны, все связи и «опосредования». Несмотря на то, что достичь этого полностью никогда не удастся, требование всестороннего охвата объекта предостерегает нас от ошибок и от омертвления. Во-вторых, диалектическая логика требует брать объект в его развитии. В-третьих, познание объекта неразрывно связано с человеческой практикой, которая выступает и как критерий истины и как практический определитель связи объекта с тем, что нужно человеку. В-четвертых, «...диалектическая логика учит, что абстрактной истины нет, истина всегда конкретна»¹.

Познавательный образ. Формирование познавательного образа (субъективной модели) при проектировании называется внутренней активностью субъекта, «скрытой» его деятельностью. Нужно отметить, что формирование субъективной модели сопровождается любой трудовой деятельностью и поэтому психофизические процессы, происходящие в сознании человека при проектировании, подчиняются общим закономерностям.

Трудовую деятельность можно условно разделить на две части: информационный поиск и обслуживание. Информационный поиск заключается в обработке информации и оценке ее. Восприятие информации включает: обнаружение объекта восприятия, выделение в нем отдельных признаков, отвечающих стоящей перед человеком задаче, ознакомление с выделенными признаками. Затем производится анализ и обобщение информации на основе заранее заданных или сформированных критериев оценки. Анализ информации сопровождается сопоставлением ее со сложившейся у человека внутренней образно-концептуальной моделью объекта. Концептуальная модель формируется в сознании человека как продукт осмысливания сложившейся ситуации с учетом стоящих перед ним задач. Различают постоянную (или медленно меняющуюся образно-концептуальную модель, хранящуюся в долговременной памяти человека) и оперативную — образующуюся в процессе переработки информации и хранящуюся в оперативной памяти.

¹ В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 42, стр. 290

Постоянная модель конкретизирует прошлый опыт человека и знания, полученные в процессе обучения. Оперативная же выступает как модель, полученная в результате преобразования входной информации и информации, поступающей из построенной концептуальной модели. В некоторых случаях, в том числе и при проектировании, возникает не одна, а несколько оперативных моделей, каждая из которых является по существу вариантом возможного решения. Третий этап трудовой деятельности, относящийся уже к обслуживанию, состоит в принятии решения. В процессе принятия решения человек манипулирует с оперативными моделями, выбирая из них ту, которая в наибольшей степени отвечает реальной ситуации и конкретной задаче. Четвертый этап заключается в приведении принятого решения в исполнение, а пятый — в контроле за результативностью исполнения.

Нужно отметить, что существуют два типа трудовой деятельности. Первый из них связан с информационным поиском весьма незначительно. Характер этой деятельности определен прямым замыканием входной информации на постоянную концептуальную модель с последующим переходом к четвертому этапу — реализации принятого решения. Такая деятельность имеет место в хорошо знакомой ситуации, она не требует творческого подхода. Второй тип носит название деятельности с отсроченным обслуживанием. Он характеризуется развернутым по времени сложным информационным поиском, когда процесс восприятия превращается в самостоятельную операцию, переходящую к формированию динамических оперативных моделей, к принятию решения и только затем к реализации этого решения. Проектирование относится именно к этому типу деятельности. Познавательный образ (модель) при проектировании существует только в сознании, формирование его связано с воображением.

Воображение — мысленное преобразование опыта и знания, ведущее к формированию наглядных образов ненаблюдаемых явлений. В отличие от чисто логического мышления, воображение позволяет видеть целое раньше частей, оно носит синтезирующий характер. Однако воображению присущи и логические построения, отражающие роль программ преобразования чувствительно-наглядных образов, как элементов, в цельный образ, служащий, в свою очередь, чувственной опорой, стимулом для абстрактного мышления. Символам воображения свойственна метафорность, многозначность. Они выступают не только знаком объекта, но заключают в себе обобщенный принцип дальнейшего развертывания свернутого в нем смыслового содержания.

Связь воображения с практикой проявляется в форме ассоциаций, когда объекты внешнего мира, ранее познанные человеком в определенном применении, отражаясь, преобразуются в нашем сознании в образы, пригодные для иного применения.

Принцип целостного отражения выражается категориями — *часть* и *целое*. Познание в связи с этими категориями можно раскрыть как движение, начинающееся с представления об объекте как о нерасчлененном целом, с последующим переходом к анализу, т. е. расчленению целого на части, а вслед за этим к воспроизведению конкретного целого. В связи с категориями части и целого уместно упомянуть об известном противоречии. Воспроизведение в сознании целого возможно только при условии познания его частей, последнее же предполагает познание целого. Разрешение этого противоречия возможно только с позиций материалистической диалектики. *Целое* — продукт познания частей, и в то же время оно — исходный пункт познания. Воспроизведение целого до изучения частей коренится, во-первых, на синтезирующей способности человеческого мышления, а во-вторых, отражает динамику внешнего мира, в котором любое целое есть часть более сложной системы и часть есть целое по отношению к ее собственным частям.

Динамика отношений частей и целого раскрывает внутренний механизм выработки технических решений при проектировании. Конечным его результатом является рабочая документация, необходимая для изготовления изделия. Она представляет собой детальную проработку частей объекта. В начальной же стадии на этапах составления технического задания и разработки технического предложения объект изучается как целое, и в то же время как часть более сложной системы, включающей, помимо проектируемого объекта, его окружение.

В диалектическом единстве частей и целого протекает и творческий поиск вариантов технического решения. Вначале на основе анализа факторов окружения в воображении проектировщика синтезируется целостный гипотетический образ объекта. В дальнейшем путем анализа этого образа внутри целого выделяются части в соответствии с выполняемой функцией. Частные функции могут реализовываться теми или иными средствами, составляющими множество. Определенное сочетание средств реализации частей составляет конкретное целое как вариант технического решения.

Синтез целого на основе перебора различных сочетаний частей представляет наиболее простую форму сознания. Именно она чаще всего поддается формализации и оказывается доступной искусственному интеллекту на базе ЭВМ. Однако случайный перебор весьма неэкономная форма мышления. Человеческое сознание может найти среди множества возможных решений нужное или наиболее рациональное целенаправленно. Такая форма сознания проявляется в виде интуиции.

Интуиция образует в нашем сознании целостный образ как бы внезапно и бессознательно. Подобное обстоятельство трактуется представителями идеалистического направления в философии как иррациональное свойство человеческого мышления, как свобод-

ная творческая деятельность. Этот ошибочный взгляд порожден непониманием познания в целом и интуиции в частности. Интуитивный синтез объекта при проектировании не может быть противопоставлен наиболее простой форме случайного перебора, но он, в то же время, и не может быть отождествлен с ней потому, во-первых, что в нем опущены многие звенья логического хода, а, во-вторых, потому, что существует не только рациональная, но и чувственная интуиция. Одним из проявлений чувственной интуиции оказывается способность человека к эмпатии, к вживанию в роль проектируемого объекта.

Способность человеческого сознания к интуитивным формам связана с целеполаганием и опережающим отображением. Наличие в сознании цели при отражении действительности в проектировании весьма существенный момент. Любая деятельность человека преследует ту или иную цель. В связи с понятием цели, отражение делится на нефункциональное и функциональное [26]. Первое из них свойственно неживой природе и базируется на причинно-следственных связях. Функциональное отражение, присущее живой природе и человеческому мышлению, связано с целями как в своем процессе, так и в его результате. Цель имеет управленческий аспект. На ее основе субъект проектирования ориентируется в множестве возможных решений, находя наилучшие из них, не производя полного перебора и сравнения. Выбор цели при проектировании весьма важный и ответственный этап. Соотношение познавательного образа с целеполаганием связано с такими категориями, как ценность и оценка [26].

Ценность — социальная характеристика объекта. Она одновременно и объективна, и субъективна. Объективность состоит в том, что ценность представляет продукт воздействия человека на природу с определенной целью для удовлетворения своих потребностей. Субъективность же ценности в том, что она проявляется только во взаимоотношении с субъектом, с его желаниями, потребностями, эмоциями.

Оценка есть форма выражения ценности. Она оказывается одной из важнейших сторон деятельности конструктора. В отличие от ученого и изобретателя, он формирует познавательный образ на фоне оценочной шкалы, в роли которой выступают достигнутые знания, существующие теории, принципы, законы.

Подход к проектированию с позиций теории познания позволяет отнести этот процесс к распознаванию [16]. Под распознаванием вообще понимается принятие решения о принадлежности того или иного конкретного объекта или явления к определенному классу. Задачу распознавания можно сформулировать следующим образом. Имеется некоторая совокупность объектов или явлений (систем); на основе определенного принципа производится их классификация, каждый класс описывается на языке словаря признаков. Необходимо установить, к какому классу относится объект или явление, поступающие на вход системы распознавания.

Решение задачи состоит в определении параметров изучаемого объекта или явления и сопоставлении их по словарю признаков с определенными классами, в результате чего делается заключение о принадлежности объекта или явления тому или иному из них. Распознавание при проектировании по существу носит тот же характер с той лишь разницей, что необходимо узнать, не каков объект, а каким он должен быть. Предварительная классификация существующих объектов составляет связанную информацию, которой располагает субъект проектирования до начала распознавания. По ходу проектирования определяются признаки (параметры) познавательного образа. Информация о них, в отличие от предыдущей, может быть названа свободной. Вообще под информацией, согласно [26], понимается воспроизведение одной системой (субъект проектирования) структуры (разнообразия и т. д.) другой (объекта проектирования), при которой она функционально выделяется и включается отражающей системой в процесс управления, жизнедеятельности и практики. По мере возрастания количества информации снижается неопределенность в формировании познавательного образа.

Распознавание при проектировании — многоуровневый процесс. Он характеризуется последовательными этапами, на каждом из которых объект проектирования получает описание на языке признаков, образующее некоторое пространство. На каждом этапе это пространство сужается, и поэтому проектирование можно рассматривать как процесс последовательных приближений. Каждый этап характеризуется своим собственным оператором, содержащим анализ и синтез.

Подход к проектированию как к распознаванию может вызывать возражение из-за кажущегося уменьшения роли творчества. Однако дело обстоит иначе. Во-первых, при проектировании распознается то, что еще не существует, но обладает определенными признаками, придающими ему общественную значимость и ценность, а это само по себе в прямом виде техническое творчество [52]. Во-вторых, процесс распознавания связан с логическим (математическим) преобразованием объектов в мышлении на основе переработки информации и отражением этих процессов в форме символов, а это — творчество в познании. Сведение проектирования в русло распознавания имеет цель — направить творчество к созданию не просто любых новых объектов техники, а лишь тех, которые обеспечивают наибольшую эффективность в достижении поставленных целей.

Стремление изучить процесс проектирования приводит к необходимости выяснить роль символов для формирования познавательных образов в актах творчества. Диалектика и логика символов позволяют установить связь между интуицией и логикой, между метафорическими образами и аналогиями, аллегориями, создаваемыми воображением, и строгими научными понятиями.

Какие же особенности такой трудовой деятельности как проектирование вызывают потребность в символах? Прежде всего, это необходимость передачи информации об объекте. Возникнув первоначально на этой основе, символы в дальнейшем стали выступать как «орудие труда» в процессе преобразования познавательного образа (модели). Графические изображения, находящиеся в строгом соответствии с объектом проектирования и несущие о нем полную информацию, называются иконическими знаками. К ним относятся чертежи рабочей документации. Оперирование со знаками связано с проектированием на завершающих этапах конструирования объекта.

На более высоком уровне символы уже не оказываются копиями проектируемого объекта, а обозначают его сущность, имея «чувственно» наглядную форму. К таким символам можно отнести принципиальные и кинематические схемы, с которыми оперируют на этапах выбора параметров и режимов действия объекта, анализа принятого решения. Этапы проектирования еще более высокого уровня требуют использования символов с большей абстракцией. Кинематические схемы, хотя и отличаются от иконических знаков тем, что представляют абстрактные идеи и понятия, однако связаны с конкретным классом объектов. На этапе поиска решений и тем более определения целей проектирования, необходимо обозначить всю область технических решений и ориентироваться в ней. Единственными средствами выполнения этих этапов до недавнего времени был естественный язык. Сложившийся исторически в процессе длительного развития человеческого общества, он обладает огромной универсальностью. Более того, все знаковые системы формируются и интерпретируются на основе естественного языка. Однако эта универсальность и многозначность оказывают плохую услугу познавательной деятельности.

Язык проектирования, как и язык науки, призванный служить истинному познанию вещей, должен быть очищен от недостатков естественного языка. Потребность в создании искусственного языка проектирования диктуется в настоящее время и стремлением к широкому использованию ЭВМ. Под искусственным языком проектирования понимается некоторая система записи сообщений об объективной действительности [28]. К языку проектирования предъявляются следующие требования: недвусмысленность (каждая запись должна допускать однозначное толкование); удобство для формализации различных действий, связанных с хранением, передачей и преобразованием информации; универсальность при описании информации в пределах поставленных задач; гибкость, допускающая внесение отдельных изменений и дополнений без ущерба для общей методики и позволяющая учитывать специфические особенности техники; целенаправленность и прикладной характер, т. е. отсутствие всякой избыточности; тесная связь с методикой проектирования; простота и доступность, позволяющие легко осваивать их специалистами сред-

ней квалификации; возможность механизации процессов кодирования.

Искусственный язык, отвечающий указанным требованиям, пока еще не создан, но имеются удачные попытки описания проектной информации на отдельных этапах проектирования. Для описания искусственного языка нужен другой язык, называемый метаязыком. Распространяя понятие предложения, как законченную смысловую конструкцию, на любые языковые системы, метаязык разбивают на два языка, один из которых предназначен для описания структуры предложений языка — объекта, а другой — для описания их смысла. Первый называют метасинтаксическим, а второй — метасемантическим.

Описание структуры предложений языка — объекта выражает «внутрисистемную» природу значения знаков, отвлеченную от содержательного смысла. Описание на метасемантическом языке характеризует предметную область языка и его смысловое значение.

2.2. ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Любая научная дисциплина должна достаточно четко определить предмет своих исследований, основные понятия и принципы. Название «Методология проектирования» объединяет два понятия: методология и проектирование. Методология вообще есть учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности. Под проектированием, как уже отмечалось, понимается процесс составления описания, необходимого для создания еще не существующего объекта. На этой основе методологию проектирования можно определить как учение о структуре, логической организации, методах и средствах составления описания, необходимого для создания еще не существующего объекта.

Уточним приведенное определение в части понятия проектирования. Несмотря на то, что в ГОСТ 22487—77 указывается, каким образом составляется описание, а именно: путем преобразования первичного описания, оптимизации заданных характеристик объекта или алгоритма его функционирования, устранения некорректности первичного описания и последовательного представления (при необходимости) описания на различных языках, нужно в определении отразить дополнительно: целенаправленность проектирования на удовлетворение определенной потребности, и особые его процедуры, предшествующие составлению описания и относящиеся к творческим актам поиска и принятия решений.

С учетом дополнений под методологией проектирования будем понимать учение о структуре, логической организации, методах и средствах поиска и принятия решений о принципе действия и составе еще не существующего объекта, наилучшим образом удовлетворяющего определенные потребности, а также составление описания, необходимого для его создания в заданных условиях.

Остановимся на некоторых основных понятиях: *проектное решение* — промежуточное или конечное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего рассмотрения или окончания проектирования; *алгоритм проектирования* — совокупность предписаний, необходимых для выполнения проектирования; *язык проектирования* — язык, предназначенный для представления и преобразования описаний при проектировании; *проектная процедура* — совокупность действий, выполнение которых оканчивается проектным решением; *проектная операция* — действие или совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры.

Охарактеризуем особенность современных методов проектирования. Сложность технических объектов, состоящих из многочисленных по-разному взаимодействующих друг с другом и окружающей средой подсистем, требует системного подхода, т. е. по выражению В. И. Ленина, охвата всех их сторон, всех связей и «опосредований». При этом вся человеческая практика должна войти в полное «определение» объекта проектирования и как критерий истины, и как практический определитель связи с тем, что нужно человеку.

Сложность современных объектов определит и сложность задач проектирования. Они не могут быть решены сразу прямым замыканием входной информации на постоянную концептуальную модель действительности, а требуют развернутого во времени сложного информационного поиска. В этих условиях общая задача распадается на подзадачи, т. е. происходит ее декомпозиция, о чем говорилось в предыдущем разделе.

Множественность путей достижения цели проектирования требует рассмотрения не одного, а многих вариантов технического решения, а каждому из которых применяются определенные методы анализа и оценки. Повторное применение методов или алгоритмов проектирования характеризует еще одну его особенность, названную итеративностью.

Современные методы проектирования должны быть ориентированы на широкое использование ЭВМ, не исключая человека при решении наиболее сложных и творческих задач. Такую особенность называют *эргатичностью*, подразумевая разумное сочетание формализованных (машинных) и неформализованных (человеческих) процедур в процессе проектирования.

Сформулируем основные задачи методологии проектирования с учетом приведенных особенностей изучаемых ею методов. Декомпозиция требует логической схемы последовательности действий, наилучшим образом организующей процесс проектирования. Построение такой схемы будем считать первой задачей методологии проектирования. Стремление к широкому использованию ЭВМ требует формализации процедур, а это, в свою очередь, — математической модели как процесса, так и объекта проектирования. Разработка математических моделей составляет вторую, а ме-

тоды и алгоритмы выполнения проектных процедур и операций — третью задачу методологии. И еще об одной задаче. Она не вытекает непосредственно из всего ранее изложенного, стоит как бы в стороне, но не теряет от этого своей важности. Это задача выбора стадий разработки объекта проектирования.

Известно, что ЕСКД предусматривает следующие стадии: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая документация. ГОСТ не обязывает выполнение всех стадий. В практике каждой проектной организации установилась традиционная стадийность. Однако она зачастую не отвечает возросшей сложности объектов проектирования. Выбор стадий разработки должен быть более гибким и устанавливаться обоснованно, а не традиционно.

Чаще всего выполняют техническое задание, технический проект и рабочую документацию, опуская техническое предложение и эскизный проект. К чему это может привести? Невыполнение работ, предусмотренных техническим предложением, а именно: выбора различных вариантов возможных решений, сравнительной оценки решений, может привести к тому, что в основу разработки будет положено не лучшее техническое решение. Невыполнение эскизного проекта может привести к выбору неоптимальных параметров объекта. С другой стороны, излишняя стадийность связана с непроизводительным расходом времени и трудовых ресурсов. Проблема состоит в том, чтобы научиться обоснованно выбирать стадии разработки с учетом сложности объекта, степени его новизны, последствий возможных ошибок при проектировании.

Как всякая действительно научная дисциплина, методология проектирования должна содержать основную концепцию, на которой воздвигается все ее сооружение. Попробуем сформулировать эту концепцию. Рассмотрение проектирования с позиций марксистско-ленинской теории познания позволило отнести этот процесс к распознаванию объекта, наилучшим образом отвечающего поставленным целям. Для образности представим — все, что нужно человеку, уже создано и находится на складе. Содержащиеся в нем объекты классифицированы по признакам: функциональным, конструктивным, качественным и др. Обращаясь на склад, человек должен осознать свои цели, сопоставить их с признаками и по ним отыскать необходимый ему объект. Можно предположить, что таких объектов окажется более одного (отсутствие объекта исключается по начальным условиям). В этом случае человек отбирает такой из них, который в наибольшей степени отвечает поставленным целям. При этом он руководствуется некоторой шкалой оценок.

Распространив такой поведенческий акт на проектирование, определим его основные компоненты: A — множество целей; P — множество признаков; X — множество технических решений; V — множество оценок.

Схема основных компонент проектирования показана на рис. 2.1. Она представляет собой граф с вершинами, означающими элементы множеств целей, признаков, технических решений и оценок, и ребрами, отображающими отношения между элементами.

Пользуясь языком теории множеств [37], проектирование технической системы можно связать с отображением на множество оценок среза произведения бинарных отношений: множества целей и множества признаков, множества признаков и множества технических решений. Обозначим:

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ — множество целей; $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ — множество признаков; $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ — множество технических решений; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_l\}$ — множество оценок.

Тогда функция проектирования может быть выражена следующим образом:

$$F : (\psi \circ \varphi(A_0)) \rightarrow V, \quad (2.1)$$

где φ — бинарное отношение между элементами множеств A и P ; ψ — бинарное отношение между элементами множеств P и X ; (при этом $\varphi \subset (A \times P)$; $\psi \subset (P \times X)$; $A_0 \subseteq A$).

Установить бинарные отношения φ и ψ означает, что надо указать на те упорядоченные пары декартового произведения, которые находятся в отношении φ и ψ соответственно.

Бинарное отношение φ между множествами A и P при проектировании означает отношение между целями и признаками, а бинарное отношение между P и X — между признаками и техническими решениями. Поскольку каждой цели может соответствовать несколько признаков, то подмножество P_i , с которым a_i находится в отношении φ , является срезом через элемент a_i .

Если для проектирования конкретного объекта выбрано подмножество A_0 множества целей A , то можно найти срез через A_0 :

$$\varphi(A_0) = ((p) (\vee a) [a \in A_0 \wedge (a, p) \in \varphi]). \quad (2.2)$$

Аналогично найдем

$$\psi(A_0) = ((x) (\vee p) [p \in P_0 \wedge (p, x) \in \psi]), \quad (2.3)$$

где P_0 — срез множества P по подмножеству A_0 .

Произведение бинарных отношений

$$\psi \circ \varphi = ((a, x)) (\vee p) [(a, p) \in \varphi \wedge (p, x) \in \psi] \quad (2.4)$$

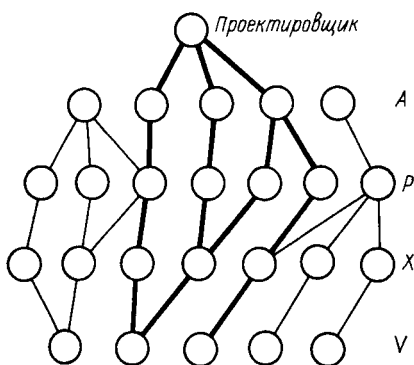


Рис. 2.1. Основные компоненты проектирования

представляет собой множество упорядоченных пар (a, x) , таких, что для них существует элемент p множества P , с которым a находится в отношении φ , а сам он вступает в отношение ψ с элементом x .

Срез произведения по подмножеству A_0 выражается:

$$\psi \circ \varphi (A_0) = \{ (a, x) \mid (\exists p) [(a, p) \in \varphi \wedge (p, x) \in \psi \wedge a \in A_0] \}. \quad (2.5)$$

Отображение среза произведения бинарных отношений на множество оценок означает функцию, определенную на множестве $\psi \circ \varphi (A_0)$ и принимающую значение на множестве V . Каждый элемент множества V при этом представляет собой в общем случае n -мерный вектор, компонентами которого являются стоимостные характеристики, характеристики полезности и др.

Выражение (2.1) можно рассматривать как целевую функцию проектирования, которую в результате выполнения определенных операций необходимо оптимизировать:

$$(F : (\psi \circ \varphi (A_0)) \rightarrow V) \rightarrow \text{opt}. \quad (2.6)$$

2.3. ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Логическая схема проектирования представлена процедурной моделью. Она реализует системный подход к этому процессу и является результатом обобщения целого ряда работ [1, 19—21, 57—59 и др.]. В основе ее лежат этапы, характерные для трудовой деятельности с отсроченной реализацией. Модель дает наглядное представление об основных процедурах и операциях проектирования, задачах и методах их решения, указывает на источники информации. Модель (рис. 2.2) согласуется со стадиями разработки согласно ЕСКД, а выпуск тех или иных видов технической документации представлен как результат соответствующих проектных процедур.

Проектирование начинается с определения потребности в создании нового изделия. Потребность в нем чаще всего диктуется состоянием общественного производства и отражается в перспективных планах партии и правительства. Внутри предприятия она может быть вызвана стремлением к повышению производительности труда или к устранению ручных операций. Инженер, постоянно наблюдающий за состоянием производства, своевременно ощущает ситуацию, препятствующую повышению производительности труда. Это вызывает стремление к ее устранению. Если возникшая ситуация хорошо знакома, то инженер может сразу принять решение и перейти к его реализации. Однако значительно чаще он не может сразу найти решение, лучшим образом удовлетворяющее возникшую потребность. В этом случае прибегают к развернутому во времени сложному информационному процессу, т. е. проектированию. Поиск может быть тогда удачным, когда имеется ясное представление о его цели.

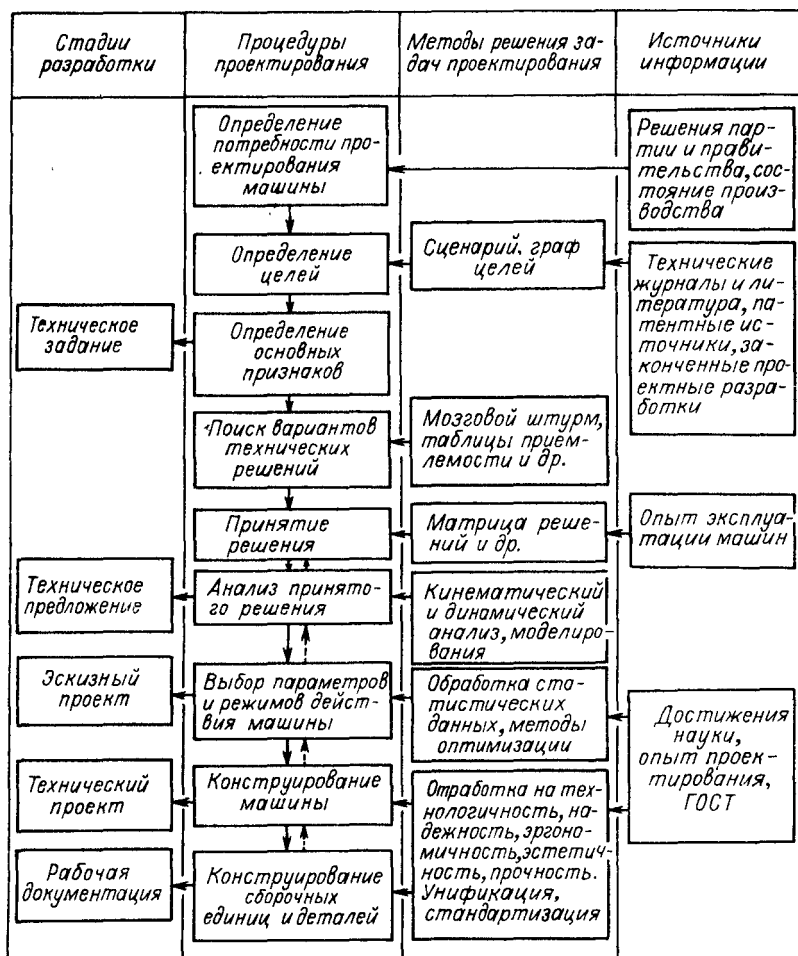


Рис. 2.2. Процедурная модель проектирования

Определение целей проектирования — весьма ответственная процедура. Во многих случаях результат разработки объектов новой техники оказывается неудовлетворительным из-за неправильной или неточной формулировки целей.

Основная задача процедуры выбора целей — распознать в общих чертах объект проектирования и его окружение. Какой-либо четкой методики решения ее нет. Определенным образом организует решение задачи составление сценария и построение графа целей. Источником информации для выполнения процедуры являются прогнозы развития самого объекта проектирования и его окружения. Весьма удобный аппарат для анализа и синтеза информации представляет инженерное прогнозирование. Оно спо-

собою ответить на такие вопросы: какие инженерные направления займут лидирующее положение в технике, каковы возможные пропорции внедрения в практику конкурирующих направлений, какова вероятность использования в будущем тех или иных направлений, какова предполагаемая эффективность реализации технических направлений и, кроме того, когда можно ожидать внедрения в производство отдельных технических решений и целых направлений. Прогнозирование сейчас, в эпоху бурного развития науки и техники, становится особенно важным. Выбирая, например, тот или иной способ воздействия на среду, как основу для создания новой машины, конструктор должен помнить, что на проектирование и внедрение в производство его разработки уйдет не менее пяти лет (речь идет о серийном изготовлении). За этот срок могут произойти существенные изменения в науке и технике, может оказаться, что выбранное направление перестанет отвечать научно-техническому прогрессу и созданная машина с первых дней своей жизни морально устареет. Чтобы этого избежать, нужно предвидеть развитие тех или иных технических направлений. На стадии определения целей уже может возникнуть то или иное решение. Однако опытный конструктор не торопится с его реализацией. Он знает, что это решение далеко не единственное.

После выбора целей проектирования можно приступить к процедуре определения основных признаков объекта. Согласно основной концепции методологии, она состоит в построении среза бинарных отношений между элементами множества целей и множества признаков по выбранному подмножеству целей. Подмножество целей и подмножество признаков включаются в техническое задание.

Процедура поиска возможных решений напоминает формирование оперативных моделей в сознании человека. Она в наибольшей степени опирается на творческие начала и выполняется чаще неформальными методами, однако уже сейчас имеются попытки разрабатывать варианты технического решения с помощью ЭВМ. В дальнейшем будут показаны приемы, организующие творческий поиск. Основные источники информации: техническая литература и журналы, авторские свидетельства и патенты.

На следующем этапе проектирования выполняется процедура принятия решения. Из множества вариантов необходимо выбрать лучший по показателю или показателям, устанавливающим соответствие технического решения ранее определенным целям. Принятие решения уже сейчас формализовано в значительно большей степени, чем предыдущие процедуры, хотя и содержит ряд задач, решаемых эвристическим методом. Для сравнения вариантов, не содержащих параметрическую информацию, можно применять матрицу решений [58] и Генеральную определительную таблицу [15]. На окончательном этапе принятия решения используется экономический расчет.

Основным источником информации для сравнения вариантов служит опыт использования существующих однотипных изделий.

Весьма полезную информацию для выполнения процедуры несет развивающаяся теория принятия решений.

Отобрав из всех возможных вариантов один, конструктор должен тщательно проверить его на работоспособность и возможность технического воплощения. Эта процедура может быть названа анализом принятого решения. Методами решения задач на данном этапе проектирования выступают: кинематический и динамический анализ, моделирование. Может оказаться, что выбранный вариант не удовлетворяет условиям работоспособности или не сможет найти в современных условиях технического воплощения. В таком случае нужно вновь вернуться к этапу принятия решения, отобрать другой вариант и произвести его анализ. На схеме процедурной модели это отражено штриховой стрелкой. Окончательным оформлением принятого решения является техническое предложение.

Любое, даже самое передовое техническое решение, окажется бесплодным, если не получит удачного технического воплощения. Прогресс техники направлен на повышение производительности труда, поэтому каждая новая машина бывает, как правило, более производительной, но не всякая новая машина оказывается более надежной (вызывается это неудачным конструированием, неправильным выбором параметров). Современная машина выступает как единый комплекс, отдельные узлы которого находятся во взаимодействии. Так, вибрационное воздействие рабочего органа, призванное повысить эффективность машины, передается не только на обрабатываемую среду, но и на раму машины, на ходовое и силовое оборудование, на систему управления, ухудшая условия работы этих узлов. Стремление к полному устранению вредного воздействия на все узлы может привести к существенному удорожанию машины. Удачная конструкция представляет собой оптимальное сочетание параметров всех ее узлов. Выбор параметров, связанный с компромиссом внутри противоречивых факторов, протекает в условиях действия всемирного закона диалектики — закона единства и борьбы противоположностей. Выбор параметров можно отнести к классу задач, которые носят название экстремальных. Тот или иной критерий качества, улучшение которого составляет цель проектирования, представляется в виде функции, подлежащей максимизации или минимизации. Аргументами ее служат параметры машины, допустимые значения которых ограничены некоторой областью. Решить поставленную задачу, значит найти такие значения аргументов из заданной области, при которых целевая функция получает экстремальное значение. По результатам процедуры выбора параметров может быть составлен эскизный проект. Он представляет собой совокупность конструкторских документов, дающих представление в общих чертах о принципе работы машины.

Получив данные о принципе действия и параметрах машины, приступают к ее конструированию. Успешное выполнение этого

этапа зависит как от опыта конструктора, так и от его умения использовать знания, достигнутые целым рядом наук: «Детали машин», на основе которой производятся прочностные расчеты; «Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения», определяющая требования к характеру и точности типовых соединений в машинах на основе эксплуатационного назначения, методы расчетно-опытного обоснования прочности, физико-технические и экономические предпосылки систем допусков и посадок, построение и применение этих систем в комплексе с техническими измерениями, метрологические обоснования качества продукции; «Надежность машин», дающая возможность оценить такие свойства будущего объекта новой техники, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость; «Эргономика», характеризующая систему «человек—машина—среда» с учетом антропометрических, гигиенических, физиологических и психофизических свойств человека; «Техническая эстетика», формирующая методы достижения выразительности, оригинальности, гармоничности и целостности форм машины; «Охрана труда», определяющая систему мероприятий по обеспечению безопасных для жизни и здоровья условий труда обслуживающего персонала; «Квалиметрия», определяющая теоретические основы количественной оценки качества продукции. Завершенная проектная разработка оформляется в виде технического проекта и рабочей документации, состав и содержание которых предусмотрены ЕСКД. При выполнении всех этих работ нужно постоянно помнить о весьма важном обстоятельстве в любой трудовой деятельности — контроле за результативностью исполнения принятого решения. В отличие от физической работы, когда человек имеет непосредственный контакт с предметом труда, при проектировании конструктор соприкасается лишь с описанием. В процессе своей работы он может допускать ошибки, смысл которых нередко оказывается скрытым до окончания технического воплощения проектируемого устройства при его испытании, а иногда и значительно позже. Поэтому в контроль за результативностью исполнения принятого решения вкладывается более широкий смысл. Помимо обычной проверки чертежей, следует практиковать анализ возможных ошибок, когда конструктор мысленно «переживает» поведение машины или ее части в тех или иных ситуациях. Чем более широк этот анализ, т. е. чем больше ситуаций может «пережить» конструктор и устранить обнаруженные ошибки, тем в большей степени можно рассчитывать на успех в работе проектируемого устройства.

В завершение отметим, что приведенная процедурная модель отражает проектирование принципиально нового объекта. В том же случае, когда он представляет собой элемент внутри типоразмерного ряда, нет необходимости выполнять все этапы проектирования, а начинать следует сразу с выбора параметров.

2.4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Распознавание при проектировании сложных систем — многоуровневый процесс. Он характеризуется последовательными этапами, предусмотренными процедурной моделью, на каждом из которых проектируемая система получает описание на языке признаков, образующих некоторое пространство. На каждом этапе область признакового пространства сужается за счет конкретизации описания структуры элементов объекта и их параметров. В этой связи описание объекта проектирования можно назвать стратифицированным [39], развивающимся от сжатого на этапах верхнего уровня процедурной модели, до развернутого на нижних. Описание объекта проектирования при использовании ЭВМ должно носить характер математических моделей. Для любой ситуации принятия решений [31] модели представляют собой множество соотношений, связывающих управляющие воздействия (переменные, значения которых выбираются лицом, принимающим решение) и параметры рассматриваемой задачи с выходными переменными (переменные, зависящие от выбора управляющих воздействий).

В содержательном смысле описание объекта проектирования в форме математической модели должно включать следующие компоненты и правила [39]: 1) A — цель функционирования; 2) $E \{e_i\}$ — множество элементов, составляющих систему; 3) $T \{t_i\}$ — множество элементов времени; 4) $P_i \{p_i^i\}$ — множество признаков, характеризующих систему в целом на всех этапах жизненного цикла; 5) $P_t \{p_t^i\}$ — множество признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла; 6) $S^i \{s_i^i\}$ — множество состояний элементов в рассматриваемый промежуток времени; 7) $H = S^i \times T$ — правило упорядочения смены состояний; 8) $Q \{e_i, e_k\}$ — множество связей между всеми элементами системы; 9) $F : \{p_i^i = f_m(p_i^i)\}$ — математические схемы, описывающие отношения между признаками элементов и признаками систем; 10) $P_c \{p_c\}$ — множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой.

Система будет определена, если определены все перечисленные множества и правила 7 и 9. Множество целей, признаков и элементов лучше всего представлять в виде графов. Множество состояний включает определенный набор значений признаков системы, подсистемы или элементов в момент времени t_i .

Элемент e_i или вся система за рассматриваемое время t_0, t_k определенное число раз переходит из одного состояния в другое. Единственный переход составляет элементарную операцию

$$Q_m = s_i^i > s_i^{i+1},$$

где s_i^i — состояние; Q_m — элементарная операция; $>$ — знак отношения порядка.

Считается, что операция определена, если для нее указаны: начальное состояние s^a , конечное состояние s^k , порядок смены состояний системы, который может быть описан дифференциальным уравнением, конечными автоматами, вероятностными автоматами, цепями Маркова, булевыми функциями, функциями предикат.

Взаимодействие элементов определяется связями, которые соединяют элементы и признаки в целое. Обычно предполагают, что связи существуют между всеми элементами. В первую очередь рассматриваются те связи, которые по заданным правилам определяют процесс взаимодействия между элементами для достижения общей цели. Множество связей между элементами (подсистемами), существующих при выполнении конкретных операций, составляет структуру системы в данной операции. Воспользуемся приведенными в работе [39] аксиомами.

Аксиома 1. Взаимодействие между элементами или подсистемами происходит по отдельным признакам. Конкретная связь может быть осуществлена только по одноименным признакам.

Аксиома 2. Между средствами (системами, подсистемами, элементами) $\sum_n$ и $\sum_k$ существует связь, если: 1) они характеризуются хотя бы одним одинаковым признаком; 2) если признаки имеют одинаковое значение (если изменение признака одного элемента приводит к изменению признака другого).

Аналитически связь между средствами $\sum_n$ и $\sum_k$ по признаку может быть определена в виде:

$$g_i^{nk} = \begin{cases} 1, & \text{если связь существует;} \\ 0, & \text{в противном случае, либо с учетом знака} \\ & (-1, 0, +1). \end{cases}$$

Процесс проектирования как переход от одного описания объекта к другому может быть выражен как

$$O_0 = \tilde{O}P_1 \Rightarrow \tilde{O}P_2 \Rightarrow \dots \tilde{O}P_i,$$

где O_0 — означает процесс проектирования; $\tilde{O}P_1, \tilde{O}P_2 \dots \tilde{O}P_i$ — описание объекта проектирования на разных этапах его разработки.

Описание объекта проектирования, определяющее достигаемые с его созданием и использованием цели, назовем целевым:

$$\tilde{O}P_1 = A_0 = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}. \quad (2.7)$$

Описание объекта проектирования, дающее представление об идее его технического решения, назовем концептуальным. Математические модели объекта при таком описании включают множество целей и множество признаков, характеризующих объект в целом на всех этапах его жизненного цикла:

$$\tilde{O}P_2 = \{A_0, P_i\}. \quad (2.8)$$

Описание, дающее представление о функционировании объекта, назовем функциональным. Математические модели, относящиеся к этому описанию, содержат множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой P_c , и правило упорядочения смены состояний H

$$\tilde{O}P_3 = \{P_c, H\}. \quad (2.9)$$

Математические модели, относящиеся к структурному описанию системы, включают следующие множества: элементов, составляющих систему E ; признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла P_t ; связей между всеми элементами системы Q , т. е.

$$\tilde{O}P_4 = \{E, P_t, Q\}. \quad (2.10)$$

Динамическое описание включает математические модели, построенные на множестве признаков, определяющих взаимодействие системы со средой P_c , множестве элементов времени T и математических схемах, описывающих отношения между признаками элементов и признаками системы:

$$\tilde{O}P_5 = \{P_c, T, F : (p_t^i = f_m(p_i^j))\}. \quad (2.11)$$

Описание, определяющее параметры объекта, назовем параметрическим. В его состав входит множество параметров

$$\tilde{O}P_6 = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n\}. \quad (2.12)$$

В автоматизированном проектировании специфика выполняемых процедур проявляется прежде всего в математических моделях объекта проектирования (МОП), зависящих от предметной области. Однако, несмотря на это, в технике построения МОП имеется много общего [34].

Различают три уровня МОП: микро-, макро- и метаяуровень.

На микроуровне фазовые переменные распределены в пространстве (распределенные модели). Модель чаще всего представляется дифференциальными уравнениями в частных производных.

На макроуровне МОП — дискретные модели, элементами которых выступают объекты, рассматриваемые на микроуровне как системы. Фазовые переменные на макроуровне — это скорости, силы, потоки, давления, а сами модели выражаются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

На метаяуровне объект проектирования (ОП) рассматривается как сложная система, взаимодействующая с факторами окружения. Для построения МОП в данном случае используются: теории автоматического управления и массового обслуживания, методы планирования эксперимента, математическая логика, теория множеств.

На любом уровне к МОП предъявляются требования точности и экономичности. Для проблемно-ориентированных САПР важна

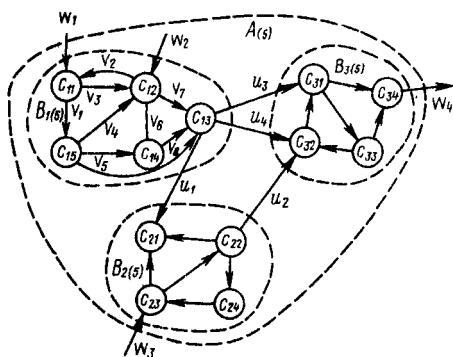


Рис. 2.3. Структурная схема объекта проектирования

еще и универсальность моделей. Под точностью МОП понимают степень совпадения предсказанных на основе моделей значений параметров, с их истинными значениями. Проверить модель на точность возможно по тестовым ситуациям.

Экономичность МОП связана с затратами на использование моделей. В САПР эти затраты связаны, в частности, с машинным временем. Универсальность МОП предполагает их использование

для целого класса объектов. По характеру отображаемых свойств ОП модели делятся на функциональные и структурные. Зачастую функциональные модели отражают в неявном виде и структуру. Это наиболее удобные модели, позволяющие анализировать выходные переменные в зависимости от структуры.

Наглядное представление о структуре ОП и взаимосвязи его элементов дает изображение в виде орграфа, на котором вершины обозначают элементы, а дуги — их взаимосвязи, характеризуемые фазовыми переменными. На рис. 2.3 контуром $A(s)$ выделен некоторый объект проектирования, состоящий из блоков (подсистем) $B_i(s)$, $i = \overline{1, 3}$ и элементов c_{ij} , $i = \overline{1, 3}$, $j = \overline{1, N_i}$ (N_i — число элементов в блоке i). Дуги w_i , $i = \overline{1, 4}$ означают независимые переменные, из них w_1, w_2, w_3 отображают входные переменные, а w_4 — выходную переменную; дуги u_i , $i = \overline{1, 4}$ представляют переменные, характеризующие внешнее состояние подсистем или внутреннее состояние системы, а дуги v_i , $i = \overline{1, 8}$ — внутреннее состояние подсистем или внешнее состояние элементов.

Статически модель объекта может быть выражена

$$W_{\text{вых}} = F_1(W_{\text{вх}}, U_{\text{вн}}),$$

где $W_{\text{вых}}$ — вектор выходных переменных; $W_{\text{вх}}$ — вектор входных переменных; $U_{\text{вн}}$ — вектор внутренних переменных системы. Или

$$F_2(W_{\text{вх}}, W_{\text{вых}}, U_{\text{вн}}) = 0.$$

Динамическая модель объекта включает производные векторов переменных, т. е.

$$F_3(W, \dot{W}, U_{\text{вн}}, \dot{U}_{\text{вн}}) = 0.$$

Представление ОП в виде конечного множества элементов означает дискретную модель. Если же структурирование не про-

изводится и процессы рассматриваются протекающими в сплошной среде, то модель будет относиться к распределенным.

Общая модель ОП, полученная объединением моделей его элементов, называется полной моделью (ПМ).

Математическая модель, аппроксимирующая полную модель при исключении внутренних переменных, составляет макромоделю объекта. Модель, в которой одни блоки отображаются ПМ, а другие — макромоделю, называется многоуровневой. Если же в ней используются уравнения разного типа, то ее называют смешанной.

По характеру переменных различают фазовые и факторные модели. Первые из них используют фазовые переменные. Если же, кроме того, фазовые переменные рассматриваются в функции времени, то фазовые модели получают название имитационных. Факторные модели оперируют с векторами параметров. Если искомые переменные в модели явно выражены через известные величины, то она носит название аналитической; если же для выражения значений искомых переменных необходимо решать систему уравнений, то модель называют алгоритмической.

МОП может быть представлена как математическими соотношениями, так и графически в виде графов или эквивалентных схем. В [34] все методы построения моделей объекта проектирования разделены на две группы. Первая из них предназначена для построения моделей элементов и всего объекта и предполагает использование неформальных (эвристических) приемов для выбора вида математических соотношений. В этом случае возможны два подхода — теоретический и экспериментальный. Первый основан на использовании физических закономерностей, характеризующих процессы, связанные с объектом. При построении модели вводят ряд допущений с учетом особенностей объекта и требуемой точности отображения зависимостей. Математические соотношения чаще всего представляются системами уравнений. Экспериментальный подход связан с проведением испытаний на самих объектах или на их физических моделях. Сюда же можно отнести и вычислительный эксперимент на полных математических моделях. По экспериментальным данным методами аппроксимации, усреднения или статистической обработки строят макромоделю объекта.

Вторую группу составляют методы получения полных математических моделей объектов из заданных математических моделей элементов. Методы второй группы инвариантны по многим областям техники. Создаваемые с помощью их модели обладают большей универсальностью. Если методы первой группы создаются в рамках специальных технических дисциплин с учетом специфики объекта, то второй — на междисциплинарной основе, включающей наиболее общие закономерности в природе и обществе.

Глава 3. ПРОЦЕДУРЫ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

3.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Техническое задание согласно ГОСТ 15.001—73* устанавливает: основное назначение, технические и тактико-технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предъявляемые к разрабатываемому изделию, выполнение необходимых стадий разработки конструкторской документации и ее состав, а также специальные требования к изделию. Техническое задание составляет разработчик на основе заявки заказчика. Заявка уже должна содержать обоснование технико-экономических требований к продукции. Если под продукцией понимать машину, то технико-экономические требования должны быть комплексными, относящимися ко всей системе, в которую она входит. Обоснование требований в такой постановке приводит к необходимости системных исследований. Выполнить это заказчику, не располагающему кадрами научных работников, затруднительно. Поэтому должное обоснование требований возлагается на разработчика. Как правило, наиболее успешно эта задача решается, если в качестве разработчика выступает научно-производственное объединение.

Продукция, подлежащая разработке и постановке на производство, по техническому уровню и качеству должна соответствовать требованиям высшей категории качества и лишь при достаточном экономическом обосновании — требованиям первой категории. Показатели, характеризующие продукцию, должны быть такими, чтобы к моменту ее выпуска они были на уровне лучших отечественных и мировых достижений или превосходящими их, обеспечивали конкурентоспособность на внешнем рынке, экономическую эффективность и удовлетворение потребностей народного хозяйства и экспорта. Для того, чтобы обеспечить такие показатели, разработке технического задания должны предшествовать: выполнение научно-исследовательских и экспериментальных работ, научного прогнозирования, анализа передовых достижений и технического уровня отечественной и зарубежной техники; изучение патентной документации, а на продукцию, предназначенную для экспорта, и требований внешнего рынка.

Техническое задание должно содержать лишь наиболее существенные требования и показатели качества, оно не должно ограничивать инициативу разработчика при поиске и выборе им оптимального решения поставленной задачи. На стадии технического задания выполняются процедуры: определения потребности проектирования, выбора целей и определения признаков объекта проектирования.

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ

Проектирование технических систем обеспечивает создание объектов новой техники, призванной повысить производительность человеческого труда, улучшить условия его выполнения, снизить стоимость совокупной общественной продукции. Потребность в новых объектах техники определяется в масштабах страны планами развития народного хозяйства, составляемыми на пятилетку и более отдаленную перспективу. Внутри отдельного предприятия потребность в новой технике возникает в ходе совершенствования производства, его интенсификации. Однако потребность в новой технике не всегда связана с потребностью проектирования. Во-первых, нужные объекты уже могут существовать, во-вторых, рационализация технологии может изменить потребность в технических средствах, в-третьих, если потребность связана с улучшением характеристик уже существующей техники, то ее удовлетворение должно дать народнохозяйственный эффект, так как в противном случае создание нового объекта нерационально.

Всегда нужно помнить, что проектирование — сложный и трудоемкий процесс. Развертывать его следует лишь в тех случаях, когда без этого обойтись нельзя. С учетом изложенного, процедуру определения потребности в проектировании можно представить как решение задачи об установлении истинности сложного высказывания, заключающегося в следующем. Технический объект нужно проектировать тогда, когда подобных объектов не существует, и от него нельзя отказаться; когда затраты на проектирование, подготовку производства и изготовление окупаются в установленный срок и приносят народнохозяйственный эффект.

Выделим из приведенного сложного высказывания элементарные: $Y1$ — технический объект имеется в нашей стране; $Y2$ — технический объект имеется за рубежом; $Y3$ — можно отказаться от объекта; $Y4$ — от применения нового объекта достигается народнохозяйственный эффект; $Y5$ — можно приобрести объект за рубежом.

Формула сложного высказывания, определяющая потребность в проектировании, имеет вид:

$$Y = \overline{Y1} \wedge \overline{Y3} \wedge \overline{Y4} \wedge (\overline{Y5} \wedge \overline{Y2}). \quad (3.1)$$

Область определения функции следующая:

$$Y = (FALSE, TRUE),$$

где $TRUE$ — проектировать нужно; $FALSE$ — проектировать не надо.

Определение истинности элементарных высказываний составляют отдельные операции. Часть из них (определение истинности $Y1$ и $Y2$) выполняются обращением к базе данных по существующим объектам соответствующего класса. Операция установления истинности высказывания $Y3$ выполняется решением

задачи, рассматривающей объект проектирования внутри системы более высокого уровня. Операция определения истинности высказывания Y_4 , определяющая достижение народнохозяйственного эффекта, строится на оценке прошлых и будущих затрат.

Воспользуемся обозначением: $P_1, I_1, \mathcal{E}_1$ — затраты по существующему объекту (аналогу) на проектирование и подготовку производства, изготовление и эксплуатацию; $P_2, I_2, \mathcal{E}_2$ — то же, по новому объекту; N_p — расчетный срок окупаемости затрат; N_d — допускаемый срок окупаемости затрат [4].

Выполнение операции по определению истинности высказывания Y_4 заключается в установлении истинности пропозициональной функции

$$Y_4 = (((P_2 + I_2 < P_1 + I_1) \wedge (\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1)) \vee \\ \vee (((P_1 + I_1) - (P_2 + I_2)) > \mathcal{E}_2) \vee (N_p < N_d)).$$

Затраты на проектирование зависят от времени разработки проекта, сложности объекта, числа конструкторов, организации работ [23]. В общем виде они могут быть выражены

$$P_{пр} = [(n' \bar{\mathcal{Z}}_к + n'' \bar{\mathcal{Z}}_{об}) (1 + K_n)] t,$$

где n' — число проектировщиков, занятых в проектировании объекта; n'' — число обслуживающего (вспомогательного) персонала (чертежники, копировщики, светокопировщики, переплетчики, архивариусы и т. п.); $\bar{\mathcal{Z}}_к$ — средняя заработная плата конструктора; $\bar{\mathcal{Z}}_{об}$ — средняя заработная плата обслуживающего персонала; K_n — коэффициент накладных расходов; t — время проектирования.

Применительно к проектированию станков ориентировочно [23] $n'' = 0,5n'$; $\bar{\mathcal{Z}}_{об} = 0,5\bar{\mathcal{Z}}_к$; $K_n = 1,0$. Тогда $P_{пр} = 2,5n'\bar{\mathcal{Z}}_к t$.

Подготовка производства к выпуску машин новой модели требует затрат, превышающих расходы на проектирование, и зависит от сложности конструкции машины и ее деталей, от количества оригинальных деталей и степени оснащения производства. Только проектирование оснастки для серийного производства станков требует в три раза больше затрат, чем на проектирование самого изделия. Например, для обеспечения выпуска одноковшового экскаватора вместимостью ковша $0,5 \text{ м}^3$, состоящего из оригинальных деталей 1571 наименования, было разработано 5600 операционных технологических карт, чертежи 900 станочных приспособлений, 281 наладка к револьверным станкам, 260 чертежей штампов, 1170 чертежей специального режущего, мерительного и вспомогательного инструмента [23].

Оценить расходы на проектирование самого объекта, а тем более на подготовку производства к его серийному выпуску, на стадии составления технического задания можно только ориенти-

ровочно. Поэтому принимаем затраты на технологическую подготовку производства следующими:

$$П_{тп} = 3П_{пр} \approx 7,5n'\bar{З}_н t.$$

Затраты на изготовление оснастки и приспособлений

$$П_{ос} = \bar{З}_п \bar{t}_о \varphi q_o (1 + K_{ин}) + \bar{C}_м \sum P_{п},$$

где $\bar{З}_п$ — средняя зарплата рабочих, занятых на изготовлении оснастки; $\bar{t}_о$ — среднее время на изготовление оснастки и приспособлений; $\varphi = N_{пр}/q_o$ — число специальных приспособлений, инструментов и оснастки; q_o — число оригинальных деталей в изделии; $K_{ин}$ — коэффициент накладных расходов по инструментальному цеху; $\sum P_{п}$ — расход материала на приспособления, инструменты и оснастку, кг; $\bar{C}_м$ — средняя стоимость 1 кг материала, приспособлений, инструмента и оснастки.

Суммируя, найдем расходы на проектирование и подготовку производства по новому объекту

$$П_2 = П_{пр} + П_{тп} + П_{ос} = 10n'\bar{З}_н t + \\ + \bar{З}_п \bar{t}_о q_o \varphi (1 + K_{ин}) + \bar{C}_м \sum P_{п}.$$

Тогда стоимость проектирования и подготовки производства, входящая в себестоимость одной машины,

$$П_2^{пр} = П_2/n_m,$$

где n_m — планируемый выпуск новых машин.

Затраты, связанные с изготовлением новой модели на стадии технического задания, можно оценить ориентировочно по удельным показателям

$$И_2 = И_1^{пр} \tau_n,$$

где $И_1^{пр}$ — удельная себестоимость изготовления существующей машины на единицу показателя, выбранного за главный; τ_n — технический показатель проектируемой машины в соответствующих единицах измерения.

Эксплуатационные расходы машины за период ее жизни складываются: из затрат на электроэнергию (топливо), смазку, оплату труда рабочих, обслуживание и ремонт, из накладных расходов и амортизационных отчислений.

Рентабельность машины

$$q = Q_T/P_T,$$

где Q_T — суммарная полезная отдача машины за весь период ее жизненного цикла, руб; P_T — расходы за этот же период.

Срок окупаемости машины

$$N_o = \frac{C_{маш}}{\eta_{исп} (Q_T - P_T - C_{маш}/D_m)}.$$

Здесь $C_{\text{маш}}$ — стоимость машины, руб; $D_{\text{м}}$ — долговечность машины, год; $\eta_{\text{исп}}$ — коэффициент использования, $\eta_{\text{исп}} = h/H_0$, где h — фактическое время работы машины; H_0 — общий период нахождения машины в эксплуатации.

Выполнение операции по определению истинности высказывания У5 о возможности приобретения объекта (серии объектов) за рубежом проводят в двух аспектах: эвристическом и формализованном. Первый предполагает учет политических факторов (политический резонанс, отношение со страной - поставщиком, а также прогнозы о дальнейшем развитии подобных объектов), формализация которых невозможна. Второй учитывает сроки внедрения при разработке объекта своими силами и затраты на его производство. Определенные условия накладывают торговые отношения со страной - поставщиком, которые могут быть построены на двух видах сделок: покупка за иностранную валюту и обмен товара на товар.

Эффективной считают такую покупку, для которой в рассматриваемый отрезок времени уровень общественно необходимых затрат на отечественное производство покупаемых изделий выше соответствующих затрат на изготовление товаров, за счет продажи которых поступает валюта для покупки. Для формализованной оценки экономической эффективности приобретения объекта за рубежом вводятся следующие коэффициенты.

Коэффициент относительной валютной эффективности внешней торговли для экспорта товаров

$$x_{\text{э}} = B_{\text{э}}/Z_{\text{э}},$$

где $B_{\text{э}}$ — валютная выручка от экспорта; $Z_{\text{э}}$ — затраты на производство экспортных товаров.

Коэффициент относительной валютной эффективности импорта

$$x_{\text{и}} = Z_{\text{и}}/B_{\text{и}},$$

где $Z_{\text{и}}$ — внутренняя стоимость импортных товаров; $B_{\text{и}}$ — валютные затраты на импорт товаров.

Коэффициент средней валютной эффективности экспорта

$$x_{\text{э.ср}} = \sum B_{\text{э}i} P_{\text{э}i} / \sum Z_{\text{э}i} P_{\text{э}i},$$

где $P_{\text{э}i}$ — размер партии i -го типа экспортируемых товаров.

Абсолютная эффективность импорта $\mathcal{E}_{\text{и}}$ определяется внутренней его стоимостью за вычетом валютных затрат на импорт, отнесенных к среднему коэффициенту валютной эффективности экспорта в страну, производящую импортные товары (экспортный эквивалент)

$$\mathcal{E}_{\text{и}} = Z_{\text{и}} - B_{\text{и}}/x_{\text{э.ср}}$$

или

$$\mathcal{E}_{\text{и}} = Z_{\text{и}} - B_{\text{и}} \sum Z_{\text{э}i} P_{\text{э}i} / \sum B_{\text{э}i} P_{\text{э}i}.$$

Схема алгоритма выполнения операции представлена на рис. 3.1. Используемые идентификаторы приведены в табл. 3.1.

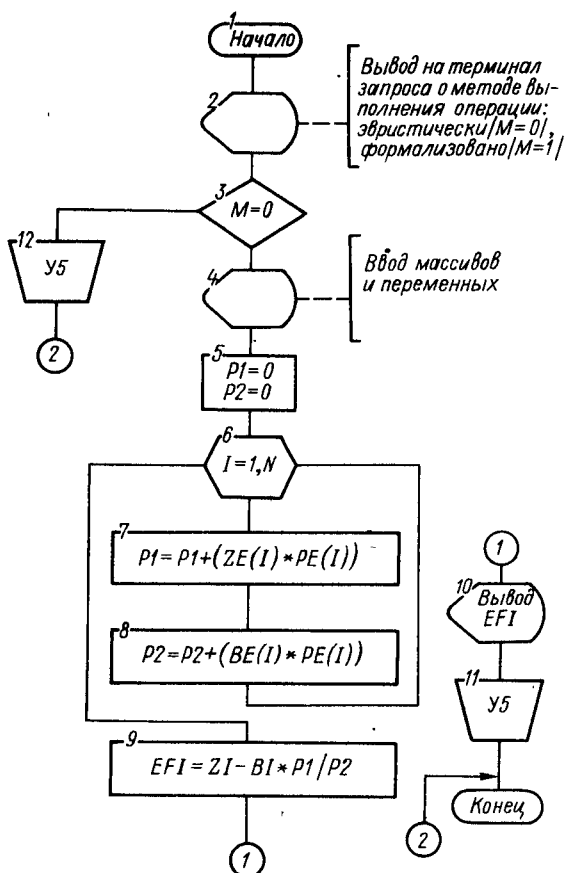


Рис. 3.1. Схема алгоритма выполнения операции по определению экономической эффективности импорта

В качестве примера рассмотрим разработку, выполненную кафедрой «Строительные и дорожные машины и оборудование» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта им. академика В. Н. Образцова совместно со строительным трестом в 1974—75 гг. Давность разработки не должна смущать читателя. Спустя более 10 лет можно судить о правильности принятого в свое время технического решения.

Среди наиболее трудоемких работ в строительстве особое место занимает разработка мерзлых грунтов. Почти половина территории Советского Союза покрыта вечномерзлыми грунтами, а сезонное промерзание грунтов даже в районе городов Фрунзе, Алма-Аты, Ростова, Киева составляет в среднем 0,9 м. В настоящее время в нашей стране ежегодный объем разработки грунта в мерзлом состоянии составляет 10—15 % от общего объема земля-

Идентификаторы на схеме алгоритма рис. 3.1

Наименование параметра	Обозначение в алгоритме
Входные параметры	
Массив валютной выручки от экспорта товаров в страну, производящую предполагаемый объект проектирования	<i>BE (I)</i>
Массив затрат на производство экспортных товаров	<i>ZE (I)</i>
Массив размеров партии экспортируемых товаров <i>I</i> -го типа	<i>PE (I)</i>
Валютные затраты на импорт объекта (серии объектов)	<i>BI</i>
Внутренняя стоимость импортного объекта	<i>ZI</i>
Выходные параметры	
Абсолютная эффективность импорта объекта (серии объектов)	<i>EFI</i>

ных работ, однако затраты на выполнение работ в мерзлых грунтах оказываются больше, чем на выполнение всего объема работ в немерзлых грунтах. Создание эффективных способов и средств разработки мерзлых грунтов — важная народнохозяйственная проблема. Единая техническая политика ориентирует нашу промышленность на ускорение создания техники, воплощающей новейшие открытия и изобретения и дающей высокий экономический эффект. В производстве орудий труда предусматривается рост единичной мощности машин, переход от создания и внедрения отдельных машин к разработке систем машин, целиком охватывающих весь технологический процесс.

Трест, обеспечивая выполнение строительных работ в Ленинграде, испытывал трудности при разработке мерзлых грунтов в ходе сооружения фундаментов в зимнее время. Имеющиеся машины (рыхлители, многоковшовые траншейные экскаваторы) не в состоянии были обеспечить снижение трудоемкости и повышение производительности труда.

Установим истинность высказывания в необходимости проектирования объекта новой техники.

1. В нашей стране машин для разработки мерзлых грунтов в условиях городского строительства, обеспечивающих меньшую трудоемкость и большую производительность труда по сравнению с рыхлителями и многоковшовыми экскаваторами, нет. На этом основании элементарное высказывание *Y1* (технический объект имеется в нашей стране) принимает значение *FALSE*.

2. За рубежом дело обстоит так же, т. е.

$$Y2 = FALSE.$$

3. Анализ показал, что избежать выполнения земляных работ в зимнее время не удастся, так как строительные работы ведутся круглый год без снижения темпов. Предварительная подготовка территории в теплое время года к последующей разработке зимой (рыхление, засоление, утепление) связана с дополнительными трудозатратами и не дает положительного эффекта. От разработки объекта новой техники отказаться нельзя, т. е.

$$Y3 = FALSE.$$

4. Определим, можно ли ожидать достижения народнохозяйственного эффекта от внедрения объекта новой техники с учетом затрат на его проектирование, изготовление и эксплуатацию. Для этого нам нужно установить истинность пропозициональной функции $Y4$. Не будем ожидать, что затраты на проектирование и изготовление объекта новой техники будут меньше аналогичных затрат для существующих машин, т. е. $(P_2 + I_2 \geq P_1 + I_1)$. Однако возможно снижение эксплуатационных расходов для объекта новой техники по сравнению с существующей $\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1$.

Поскольку $P_2 + I_2 \geq P_1 + I_1$, то условие $((P_1 + I_1) - (P_2 + I_2)) > \mathcal{E}_2$ не выполняется. Ожидать народнохозяйственного эффекта от внедрения объекта новой техники можно лишь в случае, если $N_p < N_d$. Действительно, подставив значения истинности в функцию предикат, найдем

$$Y4 = \{((P_2 + I_2)^F < P_1 + I_1) \wedge (\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1)^F\} \vee \{((P_1 + I_1) - (P_2 + I_2))^F > \mathcal{E}_2\} \vee \{N_p < N_d\}^T = TRUE.$$

5. В зарубежной практике используются рыхлители на базе более мощных тягачей по сравнению с отечественными. Однако приобрести их тресту не представилось возможным.

Подставив истинность элементарных высказываний в формулу (3.1), найдем с учетом входящих в нее отрицаний

$$Y = \overline{Y1}^T \wedge \overline{Y3}^T \wedge Y4^T \wedge (Y5^F \wedge Y2^F) = TRUE.$$

Таким образом, в описанных условиях проектирование объекта новой техники рационально, если срок окупаемости связанных с ним затрат не превысит допустимый.

3.3. ВЫБОР ЦЕЛЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Как уже отмечалось, проектирование связано с формированием оперативной модели в сознании человека. Возможность формирования такой модели обеспечивается способностью человеческого мозга к опережающему отражению действительности. Построение оперативной модели тесно примыкает к распознаванию. Как в том, так и в другом случае имеется входная информация о признаках

объекта, а на выходе — заключение о самом объекте. Разница между оперативной моделью в проектировании и распознаванием заключается лишь в том, что в первом случае самого объекта не существует, в то время как во втором — он реален. Но несмотря на это, в обоих случаях дело имеют не с самим предметом, а с его признаками. Последние могут быть установлены и для еще не существующего объекта. Так, при проектировании той или иной машины мы на первых этапах не представляем себе, как она выглядит (какую имеет форму, размеры, тип рабочего органа), однако уже с самого начала известно, что она должна делать, известны ее ориентировочная производительность, стоимость и некоторые другие исходные данные. Кроме того, можно установить, в каких условиях она будет работать (климатические условия, квалификация обслуживающего персонала и другие факторы). Проектируемый объект окажется жизнеспособен, если он будет приспособлен к окружающей среде и к заданным ему функциям. Таким образом, окружающая среда и заданные функции являются теми признаками, с помощью которых можно распознать еще не существующий объект и тем самым составить оперативную модель. Задача осложняется тем, что проектируемый объект должен быть приспособлен к окружающей среде не в настоящем времени, а в будущем. В связи с этим распознавание объекта связано с прогнозированием. В этом случае уместно обратиться к одному из приемов драматургии — приему составления сценария. Сценарий — сюжетная схема без литературного текста, по которой создается спектакль в театре, основанном на импровизации. Сценарий представляет собой краткое изложение содержания пьесы, в котором определены главные моменты действия. В работе [29] читаем: «Под сценарием в практике социально-экономического и научно-технического прогнозирования подразумевается обзор, содержащий данные относительно ситуации, внутри которой протекают конкретные процессы, являющиеся объектом прогноза. Эти данные относятся к самым различным сторонам прогнозируемой научно-технической, социальной и экономической ситуации и включают в себя описание отдельных факторов или событий, оказывающих прямое или косвенное влияние на реализацию конкретного события». Описать ситуацию, внутри которой будет протекать работа проектируемого объекта — означает установить факторы его непосредственного и косвенного окружения. К непосредственному окружению надо отнести окружающую среду, внутри которой будет обитать объект. К косвенному окружению следует отнести факторы, определенные научно-технической, экономической и социальной ситуацией. Перечисленные факторы окружения представлены на рис. 3.2. Разработка сценария сродни формированию порождающей среды, понятие о которой развивается в [43].

На первом этапе составления сценария формируются самые общие представления о проектируемом объекте и поэтому взаим-

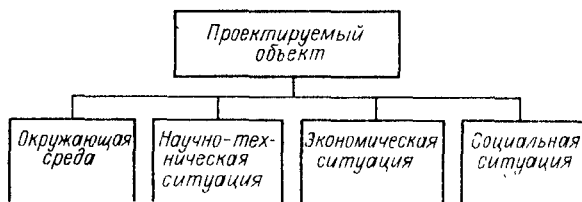


Рис. 3.2. Факторы окружения объекта проектирования

ное влияние факторов можно не учитывать. В данном случае по существу происходит лишь выявление признаков ситуации, причем следует начинать с самых простых и очевидных ситуаций, переходя затем к более сложным и менее очевидным. Выявление факторов окружения подобно эмпатии (вживанию в роль). Проектировщик ставит себя в положение будущего технического устройства и осматривается. Вначале составляется лишь перечень факторов, а затем по ходу их описания могут быть вскрыты новые факторы окружения. Составлять сценарий следует при проектировании нового изделия. После его освоения необходимо периодически вносить изменения в первоначальный сценарий для определения потребности в совершенствовании изделия, расширения или сокращения объема его производства.

Описание факторов окружения начинается с изложения существующего положения и заканчивается прогнозом на будущее. Рассматривая каждый фактор как объект прогнозирования, следует подобрать к нему наиболее соответствующий метод прогноза. Воспользуемся классификацией, приведенной в [29], которая проводится по шести признакам.

1. Признаки, обусловленные природой объекта прогнозирования:

а) научно-технические (развитие фундаментальных и прикладных исследований, развитие науки, новые виды техники, технические характеристики, изобретения и открытия в области науки и техники, новые материалы, технология);

б) технико-экономические (экономика народного хозяйства по отраслям, развитие и размещение производства, промышленные предприятия, технико-экономические показатели производства продукции, организационно-экономические системы управления, освоение новых видов продукции, финансирование производства);

в) социально-экономические (демография, трудовые ресурсы, размещение производительных сил, образование, национальный доход, спрос, потребление);

г) военно-политические (международные отношения, опасные зоны, военный потенциал, стратегический курс, военные конфликты);

д) естественно-природные (погода, окружающая среда, природные ресурсы).

2. Признаки масштабности объекта прогнозирования, определяемой числом переменных, входящих в полное описание объекта:

а) сублокальные — с числом значащих переменных от 1 до 3 (производственная функция, траектория движения в трехмерном пространстве, рабочее место);

б) локальные — с числом значащих переменных от 4 до 14 (производственный участок, материал, несложное техническое устройство);

в) субглобальные — с числом переменных от 15 до 35 (цех, спрос на продукцию предприятия с соответствующей номенклатурой);

г) глобальные — с числом переменных от 36 до 100 (предприятия, техническая система типа «станок», «агрегат», «транспортная сеть региона»);

д) суперглобальные — с числом переменных свыше 100 (отрасль, крупное предприятие, большая техническая система).

3. Признаки сложности объекта прогнозирования по степени взаимосвязности значащих переменных в их описании:

а) сверхпростые — объекты с отсутствием существенных взаимосвязей между переменными;

б) простые — объекты, в описании которых содержатся парные связи;

в) сложные — объекты, в описании которых содержатся парные и множественные связи;

г) сверхсложные — объекты, в описании которых нужно учитывать взаимосвязи всех значащих переменных.

4. Признаки степени детерминированности:

а) детерминированные — объекты, в характеристиках которых случайная составляющая несущественна;

б) стохастические — объекты, в описании которых необходим учет случайной составляющей переменных;

в) случайные, имеющие как детерминированные, так и стохастические характеристики.

5. Признаки характера развития во времени:

а) дискретные, характеристики которых изменяются скачками;

б) аperiodические — характеристики изменяются в виде аperiodической непрерывной функции;

в) циклические — характеристики изменяются в виде периодической непрерывной функции.

6. Признаки степени информационной обеспеченности:

а) объекты с достаточной количественной ретроспективной информацией;

б) объекты с недостаточной для обеспечения заданной точности прогнозирования количественной ретроспективной информацией;

в) объекты, имеющие лишь качественную ретроспективную информацию;

г) объекты с полным отсутствием ретроспективной информации.

В отечественной и зарубежной практике можно насчитать свыше 100 методов прогнозирования. В настоящее время не разработаны, да и вряд ли будут разработаны в дальнейшем, какие-либо рекомендации для однозначного выбора метода прогнозирования. Можно лишь ограничить ориентировочно область применения того или иного метода. В таблице 3.2 представлены наиболее распространенные методы прогнозирования и позиции по шести классификационным признакам, характеризующим объект.

Приступая к прогнозированию, необходимо вначале отыскать позиции, относящиеся к объекту по всем классификационным признакам, а затем подобрать метод, охватывающий возможно большее число характеризующих объект позиций.

Введем понятие коэффициента общности метода прогнозирования

$$K_{\text{общ}} = \sigma_p / \Sigma_p,$$

где σ_p — число позиций по всем признакам, охватываемых методом прогнозирования; Σ_p — общее число позиций по всем признакам.

Наибольшим коэффициентом общности обладает метод коллективного экспертного опроса (20 позиций из 24). Нужно отметить, что и все методы, имеющие отношение к опросу экспертов, обладают высоким значением этого показателя. Из других методов прогнозирования, обладающих высокой универсальностью (по коэффициенту общности), выделяется метод «Дельфи» и морфологический анализ.

Среди всех приведенных методов определенную группу объединяет инженерное прогнозирование. Оно опирается на информацию, содержащуюся в законченных проектах и научно-исследовательских разработках, в патентах и авторских свидетельствах. Согласно [15], под инженерным прогнозированием понимается научно обоснованная информация, отражающая в вероятностной постановке потенциальные возможности развития техники. На рис. 3.3 представлены источники информации, размещенные на определенных уровнях, и временные периоды прогнозирования. Инженерное прогнозирование распространяется на период не свыше 15 лет. На его основе можно получить ответы на следующие вопросы: какие направления займут лидирующее положение в технике; каковы возможные пропорции внедрения в практику конкурирующих направлений; какова вероятность использования техники; какова предполагаемая экономическая эффективность реализации технических направлений; когда можно ожидать внедрения в производство объектов техники или целых направлений ее развития.

Инженерное прогнозирование использует наиболее универсальные методы. Среди них: коллективный экспертный опрос, экстраполяция, морфологический анализ.

Таблица 3.2

Классификация методов прогнозирования

Методы прогнозирования	Классификационные признаки объекта					
	1	2	3	4	5	6
Математическая подгонка полиномами	а, б, в, д	а—д	а, б	а	б, в	а, б
Экстраполяция по элементарным функциям	а, б, в, д	а—д	а, б	а, б	б, в	а, б
Экстраполяция с дисконтированием	а, б, в, д	а—д	а, б	в, г	а, б	а
Функции с гибкой структурой	а, б	а—д	а, б	а, б, г	б, в	а
Экстраполяция по огибающим кривым	а	а	а	б	а, б	а
Авторегрессионные модели	а, б, в, д	а—д	а	б	б, в	а
Парные регрессии	а, б, в, д	а	б	б	б, в	а, б
Множественные регрессии	а, б, в, д	б—д	в, г	б	б, в	а, б
Компонентный анализ	а, б, в, д	в, г, д	в, г	б	б, в	а
Многофакторные модели	а, б, в, д	в, г, д	в, г	б	б, в	а
Экстраполяция факторов	а, б, в, д	в, г, д	в, г	б	б	а
Биологические модели роста	а, б	а	а	а, л	б	б
Биолого-технические аналоги	а	а	а, б	а, б	б, в	б
Экономические аналоги по опережающей стране	б	а, б	а—г	а, б	а, б, в	а, б, в
Технические прогнозы по опережающей области	а	а, б	а—г	а, б, в	а, б, в	а, б, в
Анализ динамики патентования	а	а, б	б	б	а, б, в	а, б, в
Публикационные методы	а	а, б, в	б, в, г	б, в	а, б, в	а, б
Цитатно-индексные методы	а, б	а, б, в	б, в, г	б, в	б, в	а, б
Коэффициент полноты и уровня техники	а, б	а, б	а—г	а, б, в	а, б, в	а, б, в
Индивидуальный экспертный опрос	а—г	а, б	а, б, в	а, б, в	а, б, в	а, б, в
Коллективный экспертный опрос	а—г	а, б, в	а—г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Историко-логический анализ	б, в, г	а, б	а—г	а, б, в	а, б, в	б, в
Экспертные комиссии	а—г	а, б	б, в, г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Морфологический анализ	а, б	а, б	а—г	а, б, в	а, б, в	в, г

Методы прогнозирования	Классификационные признаки объекта					
	1	2	3	4	5	6
Синоптическая модель	а, б, в	а, б, в	а—г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Метод «Дельфи»	а, б, в	а, б	а—г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Метод эвристического прогнозирования	а, б, в	а, б, в	а—г	а, б, в	а, б, в	б, в, г
Коллективная генерация идей	а—г	а	а—г	б, в	а	в, г
Деструктивная оценочная оценка	а—г	а	а—г	б, в	в	в, г
Динамический концептуальный анализ	а, б, в	а, б, в	в, г	б, в	а	в, г
Политические игры	г	а, б	в, г	б, в	а	в, г
Экономические игровые модели	б	а, б	б, в, г	б, в	а, б, в	б, в, г

Уровни информации

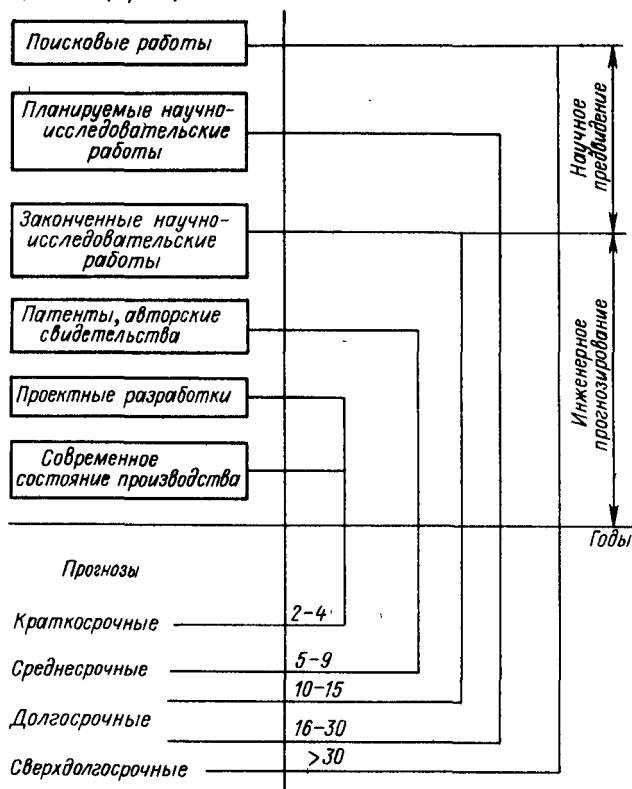


Рис. 3.3. Источники информации и временные периоды прогнозирования

Экспертные методы прогнозирования основаны на обработке мнений специалистов (*«expertus»* в переводе с латинского означает «опытный»). Опрос экспертов может производиться в устной форме (интервью) или в форме заполнения анкет. В качестве экспертов следует выбирать специалистов, признанных ведущими в данной области и имеющих некоторый опыт прогнозирования. Количественный состав экспертной группы следует формировать с учетом возможных последствий от неверного выбора целей проектирования. Так, если проектируется новое изделие для массового производства, то необходимо сформировать репрезентативную (представительную) выборку из генеральной совокупности экспертов. Для этого прежде всего определяют генеральную совокупность. В нее должны войти все известные специалисты в данной области. С учетом выделенных четырех сфер окружения объекта проектирования можно сформировать четыре группы экспертов, специализирующихся в областях: научных исследований (научно-техническая ситуация), экономики (экономическая ситуация), производства и потребления (социальная ситуация), экологии (окружающая среда). Во многих случаях не нужно производить специальный опрос экспертов. Достаточно обратиться к публикациям, в которых можно найти их высказывания по интересующему вопросу.

Экстраполяционные методы прогнозирования основаны на переносе событий и состояний из прошлого в будущее. Они используются с успехом для ситуаций, медленно изменяющихся во времени, а точнее для ситуаций, находящихся в эволюционном развитии.

Встречаются две задачи, условно называемые статической и динамической. Решением статической задачи прогнозируется изменение главного признака (параметра) с изменением факторов, которые по условию задачи находятся в пределах генеральной совокупности исследуемой области. В этом случае

$$(p - \bar{p}) = b_1(\rho_1 - \bar{\rho}_1) + b_2(\rho_2 - \bar{\rho}_2) + \dots + b_m(\rho_m - \bar{\rho}_m),$$

где $\bar{p}$ — среднестатистическое значение главного признака (параметра); $\bar{\rho}_i$ — среднестатистическое значение факторов; p , ρ_i — конкретные значения главного признака и факторов.

Коэффициенты b_1 , b_2 , ..., b_m определяются аппроксимацией данных, полученных на основе исторического обзора.

Динамическая задача прогнозирует изменение главного признака во времени

$$p = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_n t^n,$$

где b_0 , b_1 , ..., b_n — коэффициенты, определяемые по данным предпрогнозного периода; t — время, годы.

Морфологический анализ в инженерном прогнозировании применим как к эволюционному развитию, так и к качественным изменениям. На его основе можно предсказать преимущественное

развитие того или иного объекта или целого направления техники. Сравнение конкурирующих направлений или объектов производится по ряду характеристик, имеющих определенный вес. Каждая характеристика разбивается на позиции по нарастающему смысловому значению так, что следующая по номеру позиция включает в себя по смыслу предыдущие. Весьма существенным для точности прогнозирования является определение веса характеристик. Этот показатель должен отражать объективные требования к развитию техники. Оценка характеристик по весу может производиться на основе опроса экспертов или по некоторому формальному правилу ранжирования последовательности. По первому методу экспертам дается перечень характеристик и предлагается оценить их вес. По второму — также прибегают к помощи экспертов, но в этом случае им предлагается лишь распределить характеристики в определенной последовательности по степени важности. В том и другом случае для обработки полученных данных прибегают к статистическим методам. Определяется степень совпадения мнений прогнозиста и каждого эксперта

$$\xi = N_c/n,$$

где N_c — число случаев, когда мнение прогнозиста совпадает с мнением эксперта; n — общее число характеристик.

Среднее статистическое степеней совпадения по всем экспертам

$$M_{(p)} = \sum_{i=1}^{N_a} \xi_i / N_a,$$

где ξ_i — степень совпадения мнений прогнозиста и эксперта; N_a — число экспертов.

Для того чтобы мнение прогнозиста отвечало общему «скорректированному» мнению экспертов, необходимо

$$\Delta v \leq M_{(p)} \leq \overline{\Delta v},$$

где Δv , $\overline{\Delta v}$ — доверительный интервал (принимается: верхняя граница доверительного интервала — $\overline{\Delta v} = 1$, нижняя граница $\Delta v = 0,68$).

Таким образом, если $0,68 \leq M_{(p)} \leq 1$, то мнения прогнозиста и экспертов совпадают.

Формальный метод определения веса характеристик использует нормирующую функцию

$$\varphi(i) = i/2^{i-1},$$

где i — номер характеристики в ранжированной последовательности.

Характеристики и позиции сводятся в Генеральную определительную таблицу (ГОТ). Например в таблице 3.3 приведена ГОТ для прогнозирования развития строительных машин. Все позиции определяются ее порядковым номером. ГОТ дает возможность

Таблица 3.3

ГОТ строительных машин

Код	Характеристика позиции	Оценка	
		базисные I_i	окончательные $I_{ок}$
Инженерно-техническая особенность технического решения ($i = 1, \Phi_{(i)} = 1$)			
p_1	Усовершенствование деталей существующих конструкций	1,0	1,0
p_2	Усовершенствование узлов	2,0	2,0
p_3	Усовершенствование узлов на новом уровне механизации и автоматизации	3,0	3,0
p_4	Новое техническое решение	4,0	4,0
p_5	Принципиально новое техническое решение, имеющее смысл открытия	5,0	5,0
Уровень обоснованности технического решения ($i = 2, \Phi_{(i)} = 1$)			
p_1	Обоснование технического решения дано на уровне элементарных гипотез	1,0	1,0
p_2	Техническое решение основано на аналогах	2,0	2,0
p_3	Обоснование на простейших теоретических представлениях	3,0	3,0
p_4	Техническое решение основано на физических моделях	4,0	4,0
p_5	Обоснование на экспериментальных исследованиях и теоретических обобщениях	5,0	5,0
Надежность строительной машины ($i = 3, \Phi_{(i)} = 0,75$)			
p_1	Техническое решение не удовлетворяет всем четырем составляющим надежности (безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость)	1,0	0,75
p_2	Техническое решение удовлетворяет одной из составляющих	2,0	1,5
p_3	То же для двух составляющих	3,0	2,25
p_4	То же для трех составляющих	4,0	3,0
p_5	Техническое решение удовлетворяет всем составляющим надежности	5,0	3,75
Производительности машины ($i = 4, \Phi_{(i)} = 0,5$)			
p_1	Техническое решение не связано с повышением производительности труда	1,0	0,5
p_2	Некоторое повышение производительности, связанное с дополнительным расходом энергии	2,0	1,0

Код	Характеристика позиции	Оценка	
		базисные I_i	окончатель- ные $j_{ок}$
p_3	Некоторое повышение производи- тельности, не связанное с расходом дополнительной энергии	3,0	1,5
p_4	Существенное повышение произво- дительности, не связанное с допол- нительным расходом энергии	4,0	2,0
p_5	Существенное повышение произво- дительности с уменьшением расхода энергии	5,0	2,5
Выполнение эргономических требований ($i = 5, \varphi_{(i)} = 0,31$)			
p_1	Техническое решение не удовле- творяет требованиям эргономики по всем показателям (физиологиче- ским, психофизическим, антропоме- трическим, гигиеническим)	1,0	0,31
p_2	Удовлетворяются требования по одному из показателей	2,0	0,62
p_3	Удовлетворяются требования по двум показателям	3,0	0,93
p_4	Удовлетворяются требования по трем показателям	4,0	1,24
p_5	Техническое решение удовлетво- ряет всем требованиям эргономики	5,0	1,55

установить ряд показателей, по величине которых можно судить о перспективности того или иного объекта или целого направле-
ния развития техники. К таким показателям относятся следующие.

1. Коэффициент инженерно-технической значимости объекта
техники

$$\tau_{оп} = \sum_{i=1}^n j_i \varphi_{(i)} / \sum_{i=1}^n j_{max} \varphi_{(i)},$$

где j_i — номер позиции, соответствующей рассматриваемому объ-
екту по характеристике i ; $\varphi_{(i)}$ — вес i -й характеристики; j_{max} —
наибольший номер позиции по i -й характеристике; n — число
характеристик.

Чем ближе к единице оценка объекта по ГОТ, тем он перспек-
тивней. В табл. 3.4 представлена шкала прогнозной перспектив-
ности объекта в зависимости от $\tau_{оп}$.

2. Приведенное число патентов характеризует научно-техни-
ческий потенциал направления развития по анализу патентов и
авторских свидетельств

$$N_{пр. п} = \sum_{k=1}^{N_{п}} \tau_{оп. k},$$

Таблица 3.4

Значения коэффициента $\tau_{оп}$ для различных степеней перспективности

$\tau_{оп}$	Степень перспективности объекта
1,0—0,8	Весьма перспективный
0,79—0,6	Перспективный
0,59—0,4	Малоперспективный
0,39—0,2	Неперспективный

где $\tau_{оп.л}$ — коэффициент инженерно-технической значимости объекта техники по патентному источнику; $N_{п}$ — число патентов (авторских свидетельств), относящихся к данному направлению техники.

Приведенное число патентов зависит от общего числа патентов (авторских свидетельств) по данному направлению и от их инженерно-технической значимости. Техническое направление

имеющее большое значение $N_{пр.п.}$ считается более перспективным.

Необходимость тщательного анализа окружающей среды и функции объекта проектирования проиллюстрируем на весьма поучительном примере. За последние 5—10 лет отечественной промышленностью было создано несколько сотен типов промышленных роботов, многие из которых оказались весьма удачными. Ожидалось, что они получат широкое применение в производстве, освободят рабочих от тяжелого неквалифицированного труда на погрузочно-разгрузочных операциях. Однако действующие промышленные предприятия встретили роботы весьма прохладно. В данном случае дело не только в социальных факторах, важнее другое. Современное производство весьма сложный организм. Заменить в нем один элемент другим принципиально так, чтобы он продолжал действовать эффективно, дело непростое. Рабочий, занятый даже на неквалифицированной работе, в определенной мере выполняет функции синхронизатора производства. Замена его роботом далеко не всегда равноценна, особенно в технологическом процессе, подверженном случайным воздействиям. Использование роботов становится тогда эффективным, когда меняется весь технологический процесс, вся организация труда.

Приведем высказывание А. Холла. Он утверждает: «... ошибки, допущенные при выборе целей проектирования, особо тяжелы по своим последствиям. Выбрать не то техническое решение, значит создать не очень удачный объект; выбрать не те цели, значит создать не то, что нужно».

Сценарий вскрывает множество факторов, определяющих в дальнейшем направление поиска технического решения проектируемого изделия. На основе сценария можно сформулировать цели проектирования, исходя из различных сфер окружения. Для наглядного представления и систематизации целей используется так называемый граф целей. Все окружение разбивается на уровни в зависимости от их масштаба. На первом уровне помещается сфера, охватывающая интересы всего человечества; на втором — интересы государства, далее — сферы интересов от-

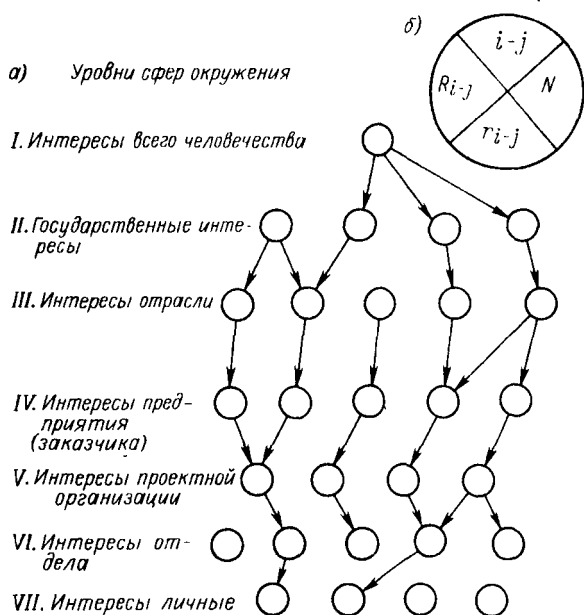


Рис. 3.4. Граф целей: а — уровни сфер окружения объекта проектирования; б — обозначения на вершинах графа целей

расли, предприятия (заказчика), проектной организации (исполнителя), отдела и, наконец, сфера личных интересов. На каждом уровне возникают свои цели, подчиненные целям более высокого уровня. Граф, вершины которого означают цели, а дуги — их отношения, и носит название графа целей. На рис. 3.4 изображен такой граф. Вершины его ориентированы относительно уровней сфер окружения. При составлении графа в каждом конкретном случае нужно прежде всего решить, начиная с какого уровня необходимо учитывать сферы окружения. Проектируемое изделие не всегда влияет на интересы государства и тем более всего человечества. Однако чрезмерное усечение уровней может оказать неучтенное воздействие в сферах более высокого уровня. Каждой цели определенного уровня можно придать относительный (в долях единицы) вес. Делать это наиболее рационально на основе экспертных оценок.

Попытаемся с помощью графа найти наиболее важные цели на каждом уровне. Для этого выполним следующее: 1) разобьем каждый кружок, означающий вершину графа, на четыре сектора; 2) в верхних секторах проставим номера вершин $i-j$, $i \in \{I, II, \dots, VII\}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ (i — номер уровня, j — номер цели на i уровне); 3) в нижних секторах запишем оценки весов целей по их относительной значимости на каждом уровне r_{i-j} .

Пока ранжирование целей проведено без учета их связей. Однако достижение некоторых из них, кроме главной, находящейся на первом уровне, оказывается средством к достижению связанных с ней целей более высокого уровня. Естественно, что конструктор яснее всего осознает свои личные цели. Достигая их, он обеспечивает выполнение связанных с ними более высоких по уровню целей. Скорректируем веса целей с учетом связей и воспользуемся понятием коэффициента связи. Определим его как произведение весов целей, связанных на графе дугой. Обозначим коэффициент связи $c_{i-j, k-m}$, где индексы i, k означают номера уровней вершин, соединенных дугой; j, m — номера вершин соответственно на уровне i и k .

Вновь вернемся к рассмотрению важности целей на каждом уровне. Теперь уже наиболее значимой следует считать ту цель, у которой оказался наибольшим абсолютный вес, равный сумме относительного веса и коэффициентов связи по заходящим дугам. Проставим значения абсолютных весов в левых секторах вершин, а в правых — место цели на данном уровне по степени ее важности. Конструктор может «обрезать» граф, отбрасывая его отдельные вершины, а в некоторых случаях и целые цепи.

Может оказаться, что в отброшенные попадут и личные цели. В этом случае конструктору придется поступиться некоторыми собственными интересами. Вершины, оставшиеся на графе, определяют наиболее важные цели, к достижению которых и должно быть направлено проектирование.

В завершение опишем кратко основное содержание и структуру процедуры выбора целей проектирования. Процедура представляет собой совокупность операций: по разработке сценария, определению полного множества целей применительно к проектированию объектов данного класса, выбору подмножества целей и ранжирования их по важности. Сценарий, включающий прогнозы развития факторов окружения, должен войти в упоминавшийся ранее банк знаний. Составленный однажды для всей области техники (землеройные машины, металлорежущие станки, грузовой транспорт и т. д.), он может «питать» информацией процедуру выбора целей проектирования как для определения полного множества, так и для конкретного его подмножества.

По мере изменения факторов окружения должен изменяться и сценарий. Процедура дает первое описание ($ОП_1$) объекта проектирования в виде упорядоченного множества целей.

Обратимся к примеру выбора целей применительно к объекту новой техники для разработки мерзлых грунтов. Наиболее существенные факторы окружения проектируемого объекта представлены схемой на рис. 3.5. Описание их начнем с научно-технической ситуации.

Научные исследования и изобретения, относящиеся к разработке мерзлых грунтов, сводятся к следующему. Сопротивляе-

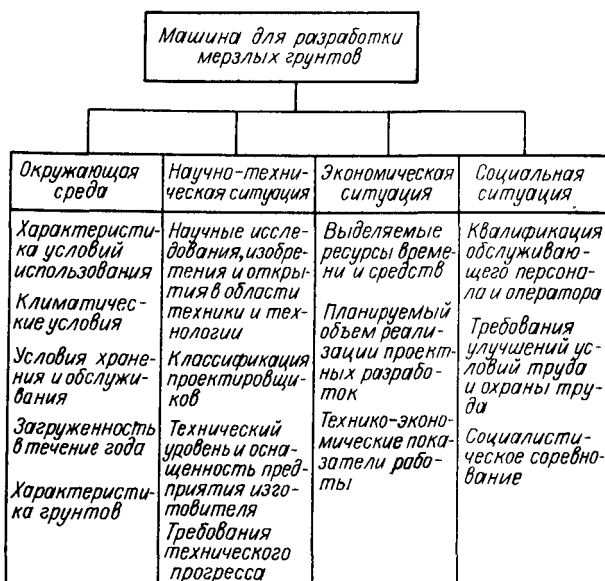


Рис. 3.5. Факторы окружения машины для нарезания щелей в мерзлом грунте

мощь разрушению мерзлых грунтов значительно выше сопротивляемости немерзлых. Это обусловлено физической особенностью, состоящей в том, что в мерзлых грунтах то или иное количество воды находится в твердом состоянии. Лед, как породообразующий материал, является льдом-цементом. Благодаря ему мерзлый грунт и приобретает значительно более высокую сопротивляемость разрушению. Другой отличительной особенностью мерзлых грунтов оказывается зависимость его механических характеристик от внешних факторов, в частности, от температуры. Эта особенность объясняется наличием в системе мерзлого грунта незамерзающей воды, находящейся в равновесном по количеству состоянии с величиной внешних воздействий. Основные структурные составляющие мерзлых грунтов: 1) твердая фаза (скелет мерзлых грунтов; криогенные материалы: лед, криогидраты, кристаллогидраты); 2) жидкая фаза; 3) газообразная фаза.

Прочность мерзлых грунтов в десятки, а иногда и сотни раз, превосходит прочность этих же грунтов в немерзлом состоянии. Кроме того, мерзлый грунт обладает высокой абразивностью. Вмороженные в массиве мерзлого грунта твердые включения: галька, щебень, валуны, становятся препятствием для разработки в значительно большей степени, чем эти же включения в немерзлых грунтах. Разрушение мерзлых грунтов имеет упруго-пластический характер. Причем с понижением температуры мерзлый грунт в большей степени приобретает хрупкие свойства. В связи с этим

рабочее оборудование, взаимодействующее с мерзлым грунтом, испытывает весьма неравномерное сопротивление. В наименьшей степени мерзлый грунт сопротивляется растяжению. Если принять условно за единицу удельное сопротивление одноосному растяжению, то можно получить следующее соотношение сопротивляемости мерзлых грунтов разрушению при других видах деформации: сдвиг — 1,7; изгиб — 2,0; одноосное сжатие — 3,0; резание — 9,0; статическое вдавливание — 21.

Из приведенного сопоставления следует, что для разрушения мерзлых грунтов рациональнее применять такие способы, при которых преобладают напряжения разрыва. Вообще под разрушением мерзлых грунтов будем понимать создание в них необратимых деформаций или перевод их в талое состояние. По этим условиям все возможные способы разрушения можно разбить на механические и термические.

Механические способы связаны с нарушением целостности массива мерзлого грунта без перевода его в талое состояние. Достигается это воздействием инструмента, а также давлением газов при взрыве. Под термическим способом разрушения мерзлых грунтов понимается изменение их физико-механических свойств за счет перевода в жидкое состояние льда—цемента, а также создание в них температурных напряжений, вызывающих необратимые деформации.

Не станем подробно останавливаться на анализе способов разрушения мерзлых грунтов. Обратимся к прогнозированию. По классификационным признакам (табл. 3.2) объект прогнозирования отвечает пунктам: 1—а, 2—б, 3—б, 4—а, 5—а, 6—а. Среди многих возможных методов выберем наиболее освоенный — анализ динамики патентования. Конкурирующие технические направления (механическое и термическое разрушение) получают в ближайшие 5—10 лет применения в объеме, пропорциональном приведенному числу патентов. Для его определения использовалась ГОТ (табл. 3.3). Оценке по ГОТ были подвергнуты авторские свидетельства, относящиеся к разработке мерзлых грунтов (класс E 02F 5/30) за последние 10 лет, и патенты, выданные в США, ФРГ, Франции, Японии, Великобритании за тот же период, опубликованные в объединенном издании патентных бюллетеней «Изобретения за рубежом». Всего было рассмотрено 115 авторских свидетельств и патентов. Из них 78 основывались на механическом разрушении, остальные — на термическом. Приведенное число патентов составило: $N_{\text{пр. п. в}} = 62,4$ для механических способов; $N_{\text{пр. п. в}} = 24,3$ для термических способов.

На основе приведенного прогноза можно было утверждать, что преимущественное применение при разработке мерзлых грунтов будут иметь в ближайшие 5—10 лет механические способы разрушения. Объясняется это тем, что термические способы пока еще более энергоемки. Возрастание единичной мощности землеройных машин позволяет все успешнее справляться с разработкой

мерзлых грунтов, и при этом удельная энергоемкость процесса снижается. С момента составления прогноза прошло более 10 лет, и его выводы подтвердились.

Квалификация проектировщиков. Проектирование средств для разработки мерзлых грунтов предполагалось вести силами инженеров и технических работников треста и института. Кафедра была намерена использовать студенческое конструкторское бюро, для участников которого проектирование и реализация объектов новой техники служат хорошей школой. Кроме того, поиск новых технических средств для разработки мерзлых грунтов и выбор их рациональных параметров составлял тему кандидатской диссертации одного из аспирантов.

Технический уровень и оснащенность предприятия-изготовителя. Изготовление проектируемого объекта трест намерен был выполнить своими силами, располагая производственной базой Управления механизации, оснащенной оборудованием, необходимым для технического обслуживания и ремонта строительных (землеройных) машин.

Требования технического прогресса. Научно-технический прогресс выдвигает задачи интенсификации производства, повышения производительности труда, снижения металлоемкости машин и энергоемкости на единицу продукции. Кроме того, должны постоянно совершенствоваться условия труда операторов машин и обслуживающего персонала.

Окружающая среда. Характеристика условий использования ОП. Проектируемое средство для разработки мерзлых грунтов планировалось использовать в условиях городского строительства при работах нулевого цикла. Объекты использования характеризовались: объемом разработки грунтов на объекте — 15 000 м³; средней дальностью перемещения с объекта на объект — 3 км.

Характеристика грунтов. В Ленинграде и Ленинградской области глубина сезонного промерзания в среднем составляет 1,2 м. Грунты в основном суглинистые, нередко насыпные с большим количеством твердых включений.

Климатические условия. Температура воздуха в зимнее время в среднем составляет —12 °С, редко опускается ниже —25 °С. Снежный покров составляет в среднем 40 см.

Условия хранения и обслуживания ОП. Хранение и техническое обслуживание объекта предполагалось на открытом воздухе, а ремонт — в цехах Управления механизации.

Загруженность ОП в течение года. В среднем средства для разработки мерзлых грунтов необходимы на объектах строительства 3 месяца в году.

Социальная ситуация. Классификация оператора и обслуживающего персонала. Проектируемый объект не предполагался к массовому выпуску, поэтому классификация оператора и обслуживающего персонала планировалась на уровне рабочих, обслуживающих обычные землеройные машины.

Требования улучшения условий и охраны труда. Улучшение условий труда связано с уменьшением трудоемкости технического обслуживания и управления машиной. При отрицательной температуре воздуха необходимо сводить к минимуму подготовку технического устройства к работе на объекте. Кабина оператора должна быть удобной, обогреваемой, иметь вентиляцию.

Социалистическое соревнование. Трест, его отделы и кафедра рассматривали разработку новой техники как форму участия в социалистическом соревновании с родственными организациями и их подразделениями.

Экономическая ситуация. Выделяемые ресурсы времени и средств. Заказчик намерен был получить рабочую документацию на изготовление средств для разработки мерзлых грунтов через год. В проектировании могли принять участие работники технического отдела треста, сотрудники кафедры, студенты. На проектные работы трест мог выделить 5 тыс. руб.

Планируемый объем реализации проектируемых средств. Объем реализации проектных разработок трестом предварительно не назначался. Для удовлетворения собственных нужд ему необходимо одновременно обеспечить работу по разработке мерзлых грунтов на 10 объектах. Это число и следовало считать ориентировочной потребностью в проектируемых средствах.

Технико-экономические показатели ОП. С точки зрения экономики трест намерен был получить экономический эффект уже на первом году эксплуатации проектируемых устройств. На этом основании за первый год эксплуатации должны были окупиться средства, выделенные на проектирование, подготовку производства и изготовление проектируемых устройств.

Сценарий. Из анализа факторов окружения проектируемого объекта составлен сценарий.

Новое устройство для разработки мерзлых грунтов появится на свет через 2 года. За этот период времени существенных изменений в технологии не произойдет. Вероятнее всего это устройство будет основано на механическом способе разрушения мерзлого грунта и будет базироваться на некоторых существующих машинах.

Внедрение будет способствовать интенсификации производства, повышению производительности труда, снижению металлоемкости и энергоемкости. Для своего изготовления оно не потребует сложной технологической оснастки производства. Устройство будет мобильно, сможет разрабатывать мерзлый грунт на глубину не менее 1 м, с учетом твердых включений. Оно не предъявит повышенных требований к содержанию и обслуживанию по сравнению с существующими машинами. Более того, снизит трудоемкость технического обслуживания, улучшит условия работы оператора. Невысокие затраты на проектирование и подготовку производства обеспечат получение экономического эффекта уже на первом году эксплуатации.

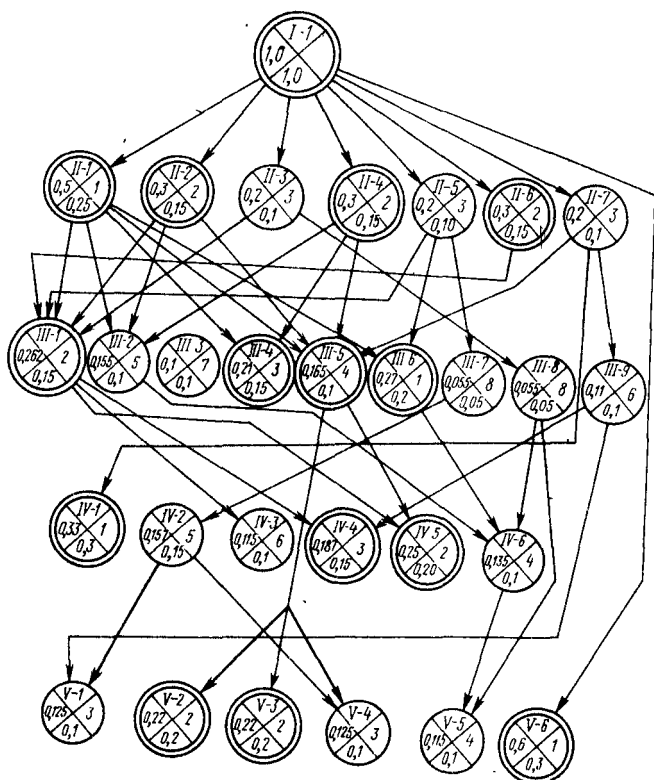


Рис. 3.6. Граф целей проектирования машины для нарезания щелей в мерзлом грунте

На основе сценария построен граф целей (рис. 3.6). Учитывая, что область применения проектируемого объекта ограничивается сферой деятельности отрасли, решено было не затрагивать интересы государства и тем более всего человечества. Целью на уровне отрасли является интенсификация производства. На графе эта цель обозначена номером I—1.

Цели на уровне предприятия (заказчика): II—1 снижение себестоимости разработки мерзлых грунтов, II—2 внедрение объектов новой техники, II—3 успех в социалистическом соревновании с другими предприятиями, II—4 своевременное завершение строительства на объектах, II—5 повышение материальной заинтересованности рабочих и служащих, II—6 улучшение условий труда, II—7 снижение затрат на внедрение новой техники.

Цели на уровне отдела, проектирующего объект: III—1 разработка объектов новой техники, III—2 выполнение проекта в установленный срок, III—3 снижение объема проектных работ, III—4 обеспечение надежности проектируемого изделия, III—5 обеспечение возможности изготовления проектируемого

изделия силами предприятия, *III—6* обеспечение экономического эффекта на первом году использования новой техники, *III—7* повышение квалификации работников отдела, *III—8* успех в социалистическом соревновании с другими отделами, *III—9* перспективность проектной разработки.

Цели кафедры: *IV—1* привлечение студентов к техническому творчеству на реальных проектных разработках, *IV—2* повышение квалификации сотрудников кафедры, *IV—3* участие в создании новой техники, *IV—4* укрепление связей с производством, *IV—5* внедрение результатов научно-исследовательской работы в производство, *IV—6* успех в социалистическом соревновании с другими кафедрами.

Цели личные: *V—1* подготовка диссертационной работы аспирантом кафедры, *V—2* материальное поощрение за разработку и внедрение новой техники, *V—3* моральное удовлетворение от успешно выполненной работы и от признания ее, *V—4* получение материала для публикаций, *V—5* получение авторских свидетельств на изобретение, *V—6* личное участие в повышении производительности труда в строительстве.

Относительные веса целей на каждом уровне были установлены путем опроса соответствующих групп экспертов. Значения этих весов проставлены в нижних секторах вершин графа. В левых секторах указаны абсолютные веса. Например, для вершины *III—4* он найден из следующего расчета. В вершину *III—4* заходят две дуги. Первая исходит из вершины *II—1*, вторая из *II—4*. Абсолютный вес вершины *III—4* $R_{III-4} = r_{II-4} + r_{II-1} r_{III-4} + r_{II-4} r_{III-4} = 0,15 + 0,25 \cdot 0,15 + 0,15 \cdot 0,15 = 0,21$.

На каждом уровне выделены наиболее значимые цели, имеющие наибольшие абсолютные веса. Соответствующие им вершины графа обведены дополнительными окружностями.

Среди личных целей наиболее значимы: личное участие в повышении производительности труда в строительстве, материальное поощрение за разработку и внедрение новой техники, моральное удовлетворение от успешно выполненной работы и от признания ее.

Наиболее значимые цели на уровне кафедры: привлечение студентов к техническому творчеству на реальных проектных разработках, внедрение результатов научно-исследовательской работы в производство, укрепление связей с производством.

Наиболее значимые цели на уровне отдела треста: обеспечение экономического эффекта на первом году использования новой техники, разработка объектов новой техники; обеспечение надежности проектируемого объекта.

Наиболее значимые цели на уровне предприятия: снижение себестоимости разработки мерзлых грунтов, внедрение объектов новой техники, своевременное завершение строительства на объектах, улучшение условий и охраны труда. Для расчета коэффициентов связи и абсолютных весов можно воспользоваться представлением графа в виде матрицы смежности размером $n \times n$,

где n — число вершин графа.

Элементы матрицы на пересечении ее строк и столбцов определяют наличие или отсутствие инцидентных вершинам дуг. Если она есть, то элемент матрицы принимает значение 1, если нет — 0. Матрица смежности оказывается симметричной относительно главной диагонали. Если граф не имеет петель, т. е. дуг, исходящих и заходящих в одну и ту же вершину, то на главной диагонали будут стоять нули. При составлении матрицы смежности графа будем считать равными 1 только те элементы, которые соответствуют парам вершин, ориентированным по направлению связывающих их дуг. Так, для графа, представленного на рис. 3.7, матрица смежности имеет вид строго треугольной матрицы:

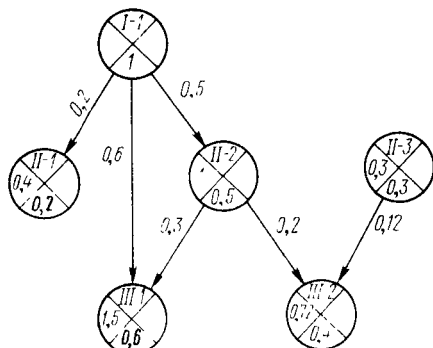


Рис. 3.7. Орграф

	$I-1$	$II-1$	$II-2$	$II-3$	$III-1$	$III-2$
$I-1$	0	1	1	0	1	0
$II-1$	0	0	0	0	0	0
$II-2$	0	0	0	0	1	1
$II-3$	0	0	0	0	0	1
$III-1$	0	0	0	0	0	0
$III-2$	0	0	0	0	0	0

Строки матрицы помечены номерами вершин, выступающих в роли предшественников, а столбцы — последователей. Поэтому элемент на пересечении строки $I-1$ со столбцом $II-1$ имеет значение 1, а на пересечении строки $II-1$ со столбцом $I-1$ — 0.

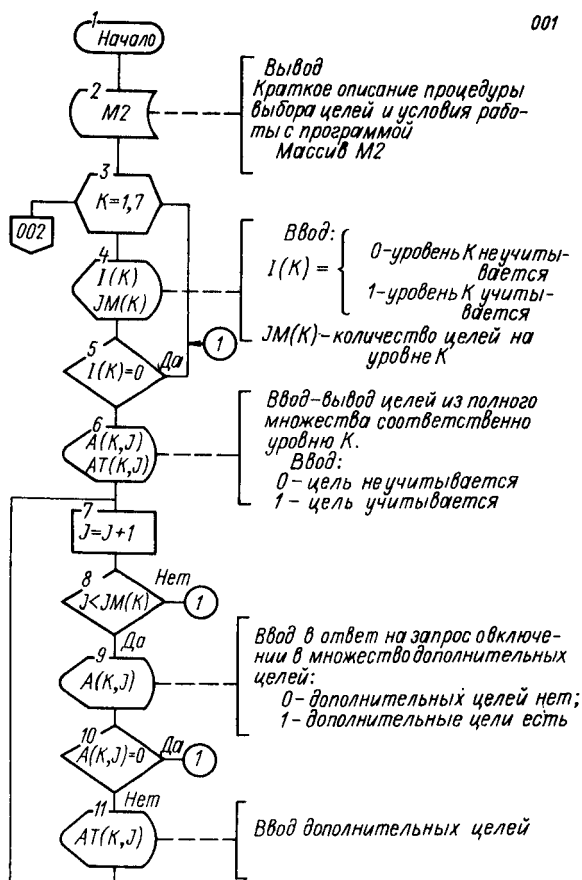
Пусть граф рис. 3.7 представляет некоторый граф целей, ориентированных относительно трех уровней. Веса целей проставлены в нижних секторах вершин. Для определения коэффициентов связей найдем вершины, инцидентные дугам, и вычислим произведения их относительных весов. Для дуги, соединяющей вершины $I-1$ и $II-1$, коэффициент связи $c_{I-1, II-1} = r_{I-1} r_{II-1} = 0$, 2; для остальных дуг соответственно:

$$\begin{aligned}
 c_{I-1, II-2} &= r_{I-1} r_{II-2} = 0,5; \\
 c_{I-1, III-1} &= r_{I-1} r_{III-1} = 0,7; \\
 c_{II-2, III-1} &= r_{II-2} r_{III-1} = 0,3; \\
 c_{II-2, III-2} &= r_{II-2} r_{III-2} = 0,2; \\
 c_{II-3, III-2} &= r_{II-3} r_{III-2} = 0,12.
 \end{aligned}$$

Такие же подсчеты можно сделать, преобразовав матрицу смежности в матрицу весов. Применительно к графу (рис. 3.7) матрица весов имеет вид:

	<i>I</i> — 1	<i>II</i> — 1	<i>II</i> — 2	<i>II</i> — 3	<i>III</i> — 1	<i>III</i> — 2
<i>I</i> — 1	0	0,2	0,5	0	0,6	0
<i>II</i> — 1	0	0	0	0	0	0
<i>II</i> — 2	0	0	0	0	0,3	0,2
<i>II</i> — 3	0	0	0	0	0	0,12
<i>III</i> — 1	0	0	0	0	0	0
<i>III</i> — 2	0	0	0	0	0	0

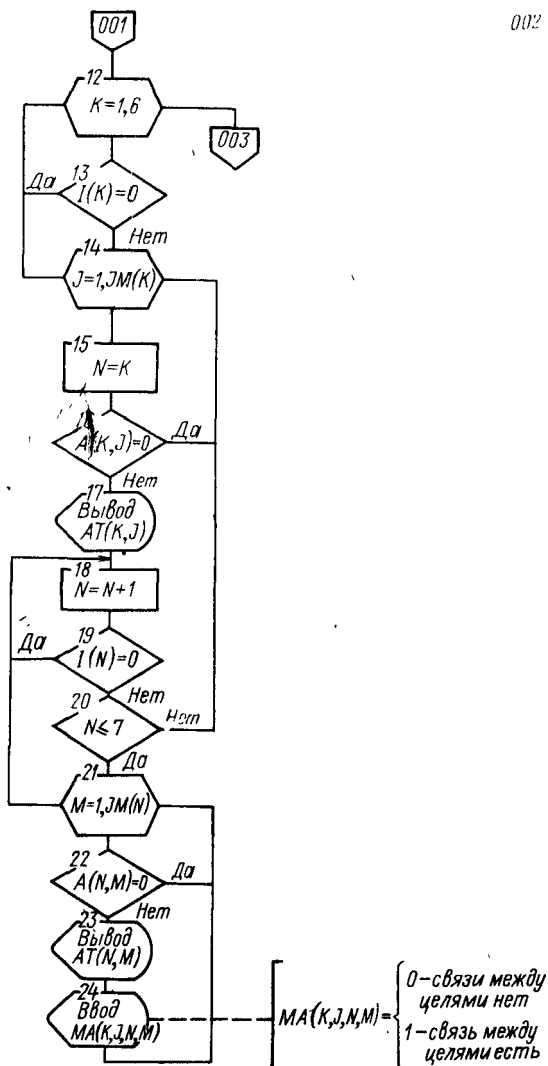
Преобразование заключается в замене элементов матрицы смежности, равных единице, на соответствующие им коэффициенты связи.



Алгоритм вычисления абсолютных весов уместно построить с учетом особенностей строго треугольной квадратичной матрицы. Элементы $c_{i-j, n-m}$, индексы которых связаны соотношением ($i \geq n$), равны 0.

Алгоритм можно организовать следующим образом: 1) преобразовать матрицу смежности в матрицу весов; 2) просуммировать по столбцам значения элементов матрицы весов; 3) полученные результаты сложить с относительными весами соответствующих вершин графа, найдя таким образом абсолютные веса целей.

Схема алгоритма представлена на рис. 3.8. Функционально она отражает циклический просмотр столбцов матрицы смежности



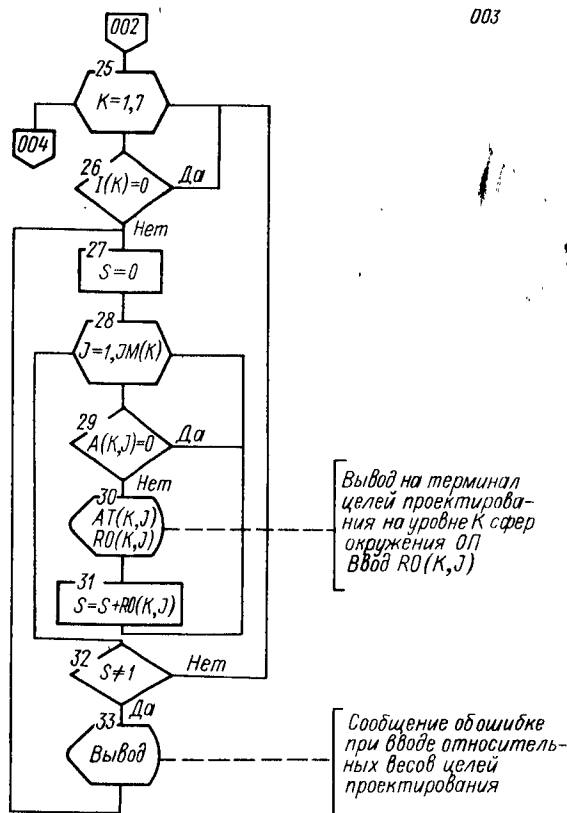
слева направо с заменой ее значащих элементов на произведение относительных весов вершин, соответствующих строке и столбцу матрицы, и суммирование элементов столбцов преобразованной матрицы.

Символ 1 означает начало работы по алгоритму; под символом 2 подразумевается сообщение пользователю о правилах работы; символам 3—11 соответствует цикл ввода целей проектирования на семи уровнях сфер окружения — интересов (1 — общечеловеческих, 2 — государственных, 3 — отрасли, 4 — заказчика, 5 — проектной организации, 6 — отдела проектной организации, 7 — личных).

Элементы массива $I(K)$ принимают значения:

$$I(K) = \begin{cases} 0 & \text{— уровень сфер окружения не учитывается;} \\ K = \overline{1,7} & \begin{cases} 1 & \text{— уровень сфер окружения учитывается.} \end{cases} \end{cases}$$

Массив $IM(K)$ в качестве элементов содержит число целей на уровне K сфер окружения.



Массив $AT(K, J)$ представляет множество наименований целей проектирования, а $A(K, J)$ — признак учета цели:

$$A(K, J) = \begin{cases} 0 & \text{— цель } J \text{ на уровне } K \text{ не учитывается;} \\ 1 & \text{— цель } J \text{ на уровне } K \text{ учитывается.} \end{cases}$$

Символ 6 означает вывод на экран видеотерминала наименований целей проектирования, предлагаемых пользователю на рассмотрение, и ввод $A(K, J)$, как ответ на вопрос об учете предлагаемой цели.

Символами 7—11 предусмотрен ввод дополнительных целей, включаемых в рассмотрение по желанию пользователя.

Цикл, охватывающий символы 12—24, представляет пользователю упорядоченные пары целей проектирования для установления связи между ними. Ввод элементов массива означает:

$$MA(K, J, N, M) = \begin{cases} 0 & \text{— связи между целями нет;} \\ 1 & \text{— связь между целями есть.} \end{cases}$$

Цикл, включающий символы от 25 до 33, организован для ввода относительных весов целей на уровнях сфер окружения. На экран видеотерминала последовательно выводятся цели проектирования и вводятся их относительные веса $RO(K, J)$.

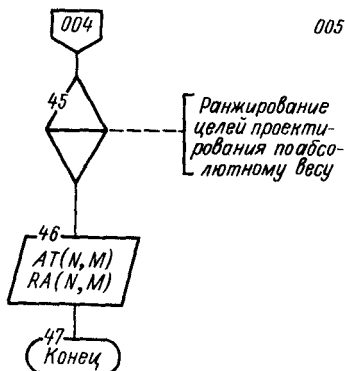
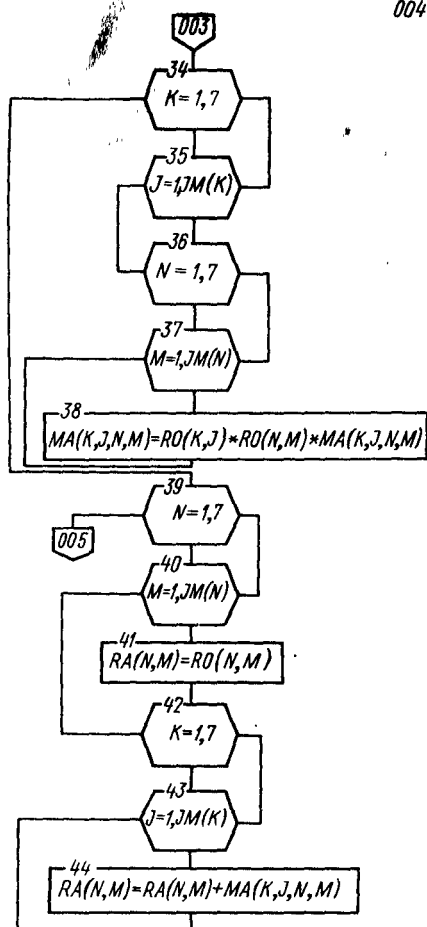


Рис. 3.8. Схема алгоритма процедуры выбора целей проектирования

Т а б л и ц а 3.5

Идентификаторы на схеме алгоритма рис. 3.8

Наименование данных в процедуре	Обозначение в алгоритме
Входные данные	
Массив данных о развитии объектов класса технических систем	$M2$
Уровни сфер окружения проектируемого объекта	K
Множество целей на уровнях сфер окружения	$AT(K, J)$
Относительный вес целей на уровнях сфер окружения	$RO(K, J)$
Число целей на уровне сфер окружения	$JM(K)$
Выходные данные	
Множество целей проектирования в ранжированной последовательности	$AT(K, J)$
Абсолютные веса целей	$RA(N, M)$

Циклы, отмеченные символами 34—38, организуют преобразование матрицы смежности в матрицу весов, а циклы, включающие символы 39—44, связаны с вычислением абсолютных весов целей.

Символ 45 означает упорядочение множества целей по абсолютным весам. В завершение на устройстве вывода отображается перечень целей проектирования в ранжированной последовательности.

Входные и выходные данные по алгоритму представлены в таблице 3.5.

Целевое описание должно включать выражение потребности проектирования и основные цели в ранжированной последовательности. Поскольку выражение потребности также можно отнести к цели проектирования, то описание в общем виде можно представить в виде выражения:

$$\tilde{O}P_1 = \{a_0[a_1, a_2, \dots, a_n]\},$$

где a_0 — выражение потребности проектирования; $a_1, a_2, \dots, a_n$, — основные цели.

В завершение описания процедуры выбора целей проектирования отметим следующее. Сценарий развития объектов проектирования, относящихся к определенной области техники, составляется в момент создания автоматизированной системы проектирования. Он аккумулирует знания, добытые практикой и наукой. Пользователю САПР этот материал можно представить в виде справки. Пользуясь ею, он решит на какие цели проектирования из полного множества следует обратить особое внимание, каким из них отдать предпочтение при определении относительных

весов. Основным практическим результатом выполнения процедуры должен стать перечень целей проектирования с указанием их абсолютных весов. Так, в примере применительно к машине для разработки мерзлого грунта приведен перечень целей, достижение которых считается необходимым условием успеха в создании новой техники для этого вида работ.

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Под признаками технической системы понимаются характеристики ее свойств, причем они могут быть как качественными, так и количественными. Количественные характеристики называют параметрами. Признаки, используемые для оценки качества изделия, составляют показатели качества. Независимо от принадлежности к той или иной области техники, объекты проектирования характеризуются определенным множеством признаков, отражающим их свойства на всех этапах жизненного цикла. Основными подмножествами признаков являются: показатели назначения, категория качества, показатели надежности, показатели технологичности, уровень унификации и стандартизации, показатели безопасности работы и обслуживания, показатели эстетичности и эргономичности, показатели экологичности, характеристики патентной чистоты, патентной защиты, характеристики условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, показатели экономичности.

Показатели назначения характеризуют эксплуатационно-технологические свойства объекта и прогрессивность его конструкции. По способу определения они могут быть измеряемыми и оцениваемыми в баллах.

К измеряемым показателям относятся:

размерные (габаритные размеры всей машины и ее составных частей, зона действия рабочего органа и др.), скоростные (транспортная скорость машины, рабочая скорость, скорость подъема и опускания рабочего органа и др.), массы (конструктивная масса, общая масса, масса противовеса и др.), проходимости (радиус поворота, дорожный просвет, угол въезда и съезда, давление на грунт и др.).

К показателям, оцениваемым в баллах, относятся: типы привода и ходового оборудования, наличие бесступенчатого регулирования скорости и наличие элементов автоматики, способ монтажа, демонтажа и др.

Категория качества выступает результирующей оценкой и может быть первой и высшей. К первой категории относят машины, находящиеся по технико-экономическим показателям на уровне современных требований народного хозяйства, отвечающие стандартам и нормативно-техническим документам, входящим в проект; к высшей категории качества относят машины, у которых технико-

экономические показатели находятся на уровне лучших мировых достижений и даже превосходят их.

Показатели надежности дают количественные характеристики проявления одного или нескольких свойств, составляющих надежность машины применительно к определенным промежуткам времени, режимам и условиям эксплуатации.

Надежность машины проявляется в ее безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Безотказность характеризует свойство машины сохранять работоспособность в течение определенного времени в определенных эксплуатационных условиях. Показателем безотказности служат [13]: вероятность безотказной работы $Q(t)$; средняя наработка до отказа T_1 ; интенсивность отказов $\lambda(t)$; параметр потока отказов $\omega(t)$; наработка на отказ T_0 .

Вероятность безотказной работы по статистической оценке имеет вид

$$\hat{Q}(t) = n(t)/N_n,$$

где $n(t)$ — число изделий, не отказавших за время t ; N_n — число испытываемых изделий.

Статистическая оценка средней наработки до отказа определяется зависимостью

$$\hat{T}_1 = \sum_{i=1}^{N_n} \tau_i / N_n,$$

где τ_i — наработка до первого отказа i -го изделия.

Интенсивность отказов представляет собой условную плотность вероятности возникновения отказа для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. По статистической оценке интенсивность отказов определяется

$$\hat{\lambda}(t) \approx \Delta n / [\Delta t n(t)],$$

где Δn — число отказов, происшедших за время Δt .

Для технических систем, допускающих восстановление, моменты отказов образуют случайный поток, называемый потоком отказов. Функция восстановления $\Omega(t)$, как показатель потока отказов, по статистической оценке определяется

$$\hat{\Omega}(t) = \sum_{i=1}^{N_n} m_i(t) / N_n,$$

где $m_i(t)$ — число отказов i -го из наблюдаемых элементов за время t .

Интенсивность потока отказов, как производная функции восстановления, статистически оценивается

$$\hat{\omega}_N(t) = \left[\sum_{i=1}^{N_n} m_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^{N_n} m_i(t) \right] / (N_n \Delta t).$$

Интенсивность ординарных потоков отказов без последствия называется параметром потока отказов.

Наработка на отказ (за период t_1, t_2)

$$T_0 = (t_2 - t_1) / [\Omega(t_2) - \Omega(t_1)].$$

Для периода времени, стремящегося к бесконечности, становятся справедливыми следующие соотношения:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Omega(t)/t = 1/T_0;$$

$$\Omega(t) = (t/T_0) + (s^2/2T_0^2) - 0,5,$$

где s — среднее квадратическое отклонение случайной величины τ .

Долговечность определяется свойством машины длительно (с учетом ремонтов) сохранять работоспособность в условиях эксплуатации до разрушения или другого состояния, при котором невозможна нормальная эксплуатация.

Показателями долговечности выступают: гамма-процентный ресурс R_γ ; средний ресурс $R_{ср}$; назначенный ресурс; средний ресурс между текущими (капитальными) ремонтами $R_{т.р}$ ($R_{к.р}$); средний ресурс до списания $R_{ом}$; средний ресурс до текущего (капитального) ремонта; гамма-процентный срок службы; средний срок службы; средний срок службы между текущими (капитальными) ремонтами; средний срок службы до текущего (капитального) ремонта; средний срок службы до списания.

Ресурс или срок службы равен календарному периоду времени до наступления предельного состояния [13]. Средний ресурс по статистической оценке

$$\widehat{R}_{ср} = \sum_{i=1}^{N_n} t_{R(i)} / N_n,$$

где $t_{R(i)}$ — ресурс до наступления предельного состояния i -го изделия.

Время, в течение которого объект не достигает предельного состояния с вероятностью γ процентов, называется гамма-процентным ресурсом R_γ . Величина R_γ может быть найдена по кривой распределения $F_R(t)$ случайной величины τ , на основе уравнения

$$1 - F_R(R_\gamma) = \gamma/100.$$

Остальные показатели характеризуют время до наступления тех или иных событий или между событиями (текущий или капитальный ремонт, списание).

Ремонтопригодность означает приспособленность машины к восстановлению ее работоспособности и поддержанию технического ресурса путем предупреждения, обнаружения и устранения неисправности и отказов. Показателями ремонтпригодности являются: вероятность восстановления в заданное время; среднее время восстановления $T_{\text{в}}$.

Статистическая оценка среднего времени восстановления

$$\hat{T}_n = \sum_{i=1}^{N_n} \tau_{iB} / N_n,$$

где τ_{iB} — длительность восстановления i -го изделия.

Вероятность восстановления в заданное время может быть найдена по известному закону распределения случайной величины времени восстановления $L(t)$.

Сохраняемость подразумевает свойство сохранять эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения или транспортирования, установленного в технической документации. Показатели сохраняемости: гамма-процентный срок сохраняемости; средний срок сохраняемости.

Основные показатели технологичности распределены по шести группам: 1) по трудоемкости (изготовления изделия, изготовления по видам работ, подготовки изделия к функционированию, профилактического обслуживания, ремонта изделия); 2) по себестоимости (технологической, подготовки изделия к функционированию, профилактического обслуживания изделия, ремонта изделия); 3) по унификации и взаимозаменяемости (коэффициенты унификации изделия, унификации конструктивных элементов, стандартизации изделия, повторяемости, взаимозаменяемости); 4) по расходу материала (масса изделия, коэффициенты использования материала и применимости материала); 5) по обработке (коэффициенты точности обработки и шероховатости поверхности); 6) по составу конструкции (коэффициенты сборности и перспективного использования в других изделиях).

Отработка конструкции машины на технологичность связана со снижением трудоемкости и себестоимости ее изготовления, технического обслуживания и ремонта. Некоторые из приведенных показателей могут иметь абсолютные значения, другие относительные и удельные.

Уровень стандартизации и унификации характеризует насыщенность объекта стандартными и унифицированными составными частями. Для его оценки используются два коэффициента: применяемости $K_{пр}^r$ и повторяемости $K_{пв}$.

Коэффициент применяемости определяется в процентах отношением разности общего числа типоразмеров составных частей n и типоразмеров оригинальных составных частей n_o к общему числу типоразмеров составных частей:

$$K_{пр}^r = \frac{n - n_o}{n} 100.$$

Коэффициент повторяемости есть отношение, выраженное в процентах, повторяющихся составных частей к общему числу составных частей

$$K_{пв} = \frac{N_s - n}{N_s - 1} 100,$$

где N_s — общее число составных частей.

Показатели безопасности работы и обслуживания характеризуют ряд свойств объекта, обеспечивающих активную, пассивную и послеаварийную безопасность [13]. *Активная безопасность* включает комплекс эксплуатационных свойств, способствующих предотвращению аварийных ситуаций: динамические и тормозные качества; устойчивость против заноса и опрокидывания; обзорность из кабин управления; обеспеченность сигнализацией и приборами; надежность и долговечность элементов, разрушение которых может привести к аварийной ситуации; обеспеченность световой и звуковой сигнализацией; наличие автоматических устройств безопасности и блокировки.

Пассивная безопасность обозначает свойства, благодаря которым исключается или хотя бы снижается вероятность травм экипажа в случае аварии: жесткость и прочность конструкции кабины; наличие конструкций, защищающих кабину от внешних нагрузок; применение бесосколочных стекол; предотвращение самопроизвольного открывания дверей; отсутствие внутри кабины выступающих частей с острыми углами и кромками, наличие предохранительных ремней; наличие защитных решеток на окнах и др. *Послеаварийная безопасность* означает возможность быстрого выхода людей из аварийной машины: пожарная безопасность обеспечивается соответствующим размещением и надежной герметизацией топливных баков и топливных коммуникаций; наличие аварийного люка и др.

Признаки эргономичности отражают соответствие конструкции машины гигиеническим условиям жизнедеятельности и работоспособности человека, а также его антропометрическим, физиологическим и психофизическим свойствам.

Признаки эстетичности характеризуют выразительность формы, ее соответствие господствующей моде, обеспечение целостности и гармоничности в восприятии. Основные показатели эстетичности: композиционная целостность формы (гармония внешней и внутренней формы, соблюдение принципов повторяемости, равновесия); функциональная целостность формы (соответствие формы назначению и приспособленность ее к выполняемым функциям объекта, соблюдение принципов соподчиненности и соразмерности, принципа единства; товарный вид, определяемый состоянием наружной отделки (профилем конструкционного материала, чистотой выполнения контуров, окружений и сочленений элементов, тщательностью нанесения покрытий и отделки поверхностей, четкостью надписей и обозначений, их наглядной выразительностью и т. д.).

Признаки экологичности характеризуют воздействие объекта на окружающую среду, людей, животных, растительный мир, воздушную среду. К основным показателям экологических свойств относятся: уровень звука внешнего шума; содержание углекислого газа в продуктах сгорания топлива.

Признаки патентной чистоты характеризуют конструкцию объекта с точки зрения нарушения действующих в определенной стране патентов и свидетельств на полезные модели и промышленные образцы, а также товарные знаки. Показатель патентной чистоты характеризует возможность беспрепятственной реализации машины как в СССР, так и за рубежом. В качестве обобщенного показателя патентной чистоты используется коэффициент

$$P_p = \Gamma / \Gamma_0,$$

где Γ — число ведущих стран, по которым объект обладает патентной чистотой; Γ_0 — общее число ведущих стран по данному виду объекта.

Признак патентной защиты характеризует число и весомость отечественных изобретений, реализованных в данной машине. Показатель патентной защиты определяется как сумма чисел, защищающих составные части объекта авторских свидетельств, выданных в СССР, и патентов за границей,

$$P_{п.з} = P'_{п.з} + P''_{п.з}.$$

Здесь

$$P'_{п.з} = k_{(a)i} N_{(a)i} / N; \quad P''_{п.з} = k_{(n)i} N_{(n)i} / N,$$

где $k_{(a)i}$, $k_{(n)i}$ — коэффициенты весомости авторских свидетельств в СССР и патентов за границей, защищающих составные части объекта; $N_{(a)i}$, $N_{(n)i}$ — число авторских свидетельств и патентов, защищающих составные части объекта; N — общее число составных частей в машине.

Признаки, характеризующие условия эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, выражаются показателями [13]: продуктивности, качественной работоспособности, ресурсопотребляемости, ремонтпригодности, сохраняемости, транспортабельности.

Продуктивность выражает способность машины выполнять определенный объем работы в течение отрезка времени заданной продолжительности ($T_{пл}$) при отсутствии простоев по независимым от машины причинам

$$P = \omega_t T_{пл} k_{пр} k_{нр}, \quad (3.2)$$

где ω_t — производительность за 1 ч технологического времени; $T_{пл}$ — планируемое время работы машины; $k_{пр}$ — коэффициент простоев машины по независимым от нее причинам; $k_{нр}$ — коэффициент непрерывности, отражающий простои и перерывы в работе, обусловленные в полной мере или частично конструкцией машины.

Коэффициенты простоев и непрерывности определяются соответственно: $k_{пр} = 1 - (T_{пр} / T_{пл})$; $k_{нр} = T_t / (T_{пл} - T_{пр})$, где $T_{пр}$ — продолжительность простоев машины по независимым от нее причинам; T_t — технологическое время работы машины.

В планируемое время работы машины входят следующие составляющие времени; T_0 — основной работы, в течение которого основные рабочие органы находятся под нагрузкой; T_1 — холостой работы, предусмотренное технологическим процессом; T_2 — технологического обслуживания (заправка технологического материала, технологическая регулировка режима работы, технологические переезды, время маневрирования, технологические простои); T_3 — на устранение технологических отказов (залипание, буксование, затоваривание конвейера, забивание дерном и корнями и пр.); T_4 — холостых переездов в пределах строительной площадки, не связанных с выполнением технологического процесса; T_5 — подготовки машины к работе (перевод в рабочее и транспортное положение, подсоединение прицепного оборудования, пуск двигателя и др.); T_6 — регламентируемых затрат (в течение смены), используемое на получение наряда, отдых и личные надобности; T_7 — на проведение ежесменного технического обслуживания; T_8 — на переоборудование и комплектование (замена рабочего органа и исполнительных механизмов, регулировка рабочего органа, обусловленная изменением технологического процесса, и пр.); T_9 — на проведение периодического технического обслуживания, ремонта и диагностирования; T_{10} — на перерывы в работе, вызванные устранением дефектов продукции с использованием машины; T_{11} — на устранение технических отказов; T_{12} — на простои, обусловленные недостаточной приспособленностью машин к различным природно-климатическим условиям (отсутствие кабины, малый клиренс, перегрев внутренней среды и др.); T_{13} — перебазировки с объекта на объект; T_{14} — простоев по независящим от машины причинам (организационные, метеорологические и пр.).

Элементы T_0, T_1, T_2 образуют технологическое время работы машины T_T ; $T_T, T_3, \dots, T_8, T_{10}$ составляют время непосредственного использования машины по назначению T_p ; $T_0, \dots, T_{11}, T_{13}$ в сумме составляют время эксплуатации машины T_Σ .

Из выражения (3.2) следует, что продуктивность обуславливается производительностью за 1 ч технологического времени и непрерывностью работы. Для машин непрерывного действия производительность определяется выражением

$$\omega_{т.п} = vF (T_0/T_T),$$

где v — скорость рабочего перемещения машины; F — площадь (длина) контакта рабочего органа со средой.

Для машин циклического действия

$$\omega_{т.ц} = Q/T_\Sigma,$$

где Q — продукция за цикл; T_Σ — время цикла.

Коэффициент непрерывности $k_{нр}$, как показатель продуктивности, может быть найден следующим образом:

$$k_{нр} = (T_p/T_\Sigma) (T_T/T_p).$$

Кроме этого показателя продуктивность связана:

1) с коэффициентом потерь времени из-за технологических отказов

$$k_3 = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_3) = nt_{от} / (nt_{от} + nt_{в. \tau}) = t_{от} / (t_{от} + t_{в. \tau}),$$

где $t_{от}$ — средняя наработка на один технологический отказ; $t_{в. \tau}$ — среднее время восстановления одного технологического отказа;

2) с коэффициентом потерь времени из-за холостых переездов в пределах строительной площадки

$$k_4 = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_4) = 1 / (1 + T_4 / T_{\tau}) = 1 / (1 + t_{пр4} / t_4),$$

где t_4 , $t_{пр4}$ — средние периодичность и продолжительность холостых переездов соответственно;

3) с коэффициентом потерь из-за подготовки машин к работе

$$k_5 = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_5) = 1 / (1 + T_5 / T_{\tau}) = 1 / (1 + t_{пр5} / t_5),$$

где t_5 , $t_{пр5}$ — средние периодичность и продолжительность одной подготовки машины к работе соответственно;

4) с коэффициентом потерь из-за регламентируемых затрат времени

$$k_6 = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_6) = 1 / (1 + T_6 / T_{\tau});$$

5) с коэффициентом потерь из-за проведения ежесменного технического обслуживания

$$k_7 = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_7) = 1 / (1 + t_{пр7} / t_7),$$

где t_7 , $t_{пр7}$ — средние периодичность и продолжительность проведения сменного технического обслуживания в часах технологического времени соответственно;

6) с коэффициентом потерь на переоборудование и комплектование

$$k_8 = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_8) = 1 / (1 + t_{пр8} / t_8),$$

где t_8 , $t_{пр8}$ — средние периодичность и продолжительность переоборудования и комплектования машины в связи с изменением технологического процесса соответственно;

7) с коэффициентом потерь из-за проведения периодических видов технического обслуживания, ремонта и диагностирования

$$k_9 = 1 / (1 + T_9 / T_p),$$

где $T_9 / T_p = \sum_{i=1}^n (t_{пр. \tau. о. i} / t_{\tau. о. i}) + \sum_{j=1}^k (t_{пр. д. j} / t_{д. j}) + \sum_{\mu=1}^l (t_{пр. о. \mu} / t_{о. \mu}) + \sum_{f=1}^z (t_{пр. к. p. f} / t_{к. p. f})$; $t_{пр. \tau. о. i}$, $t_{\tau. о. i}$ — соответственно продолжительность выполнения и периодичность технического обслуживания i -го вида; n — число видов технического обслуживания; $t_{пр. д. j}$, $t_{д. j}$ — продолжительность и периодичность диагностирования j -го вида; $t_{пр. о. \mu}$, $t_{о. \mu}$ — продолжительность замены и назначенный

ресурс μ -й установки; $t_{\text{пр. к. р. } f}$, $t_{\text{к. р. } f}$ — продолжительность и средний ресурс f -го по счету капитального ремонта;

8) с коэффициентом потерь, вызванным устранением дефектов в работе самой машины

$$k_{10} = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_{10}) = 1 / (1 + t_{\text{в } 10} / t_{010}),$$

где $t_{\text{в } 10}$ — среднее время устранения одного дефекта при повторном действии машины; t_{010} — среднее время между появлением дефекта продукции;

9) с коэффициентом потерь из-за устранения технических отказов

$$k_{11} = T_{\text{р}} / (T_{\text{р}} + T_{11}) = 1 / (1 + T_{11} / T_{\text{р}}) = 1 / (1 + t_{\text{в } 11} / t_{011}),$$

где $t_{\text{в } 11}$ — среднее время устранения одного отказа в течение рабочего времени; t_{011} — средняя наработка между отказами;

10) с коэффициентом потерь, обусловленных простоями из-за недостаточной приспособленности машины к природно-климатическим условиям

$$k_{12} = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_{12}) = 1 / (1 + T_{12} / T_{\tau}) = 1 / (1 + t_{\text{пр } 12} / t_{12}),$$

где $t_{\text{пр } 12}$, t_{12} — средние продолжительность и периодичность одного простоя из-за недостаточной приспособленности к природно-климатическим условиям соответственно;

11) с коэффициентом потерь, вызванных перебазированием машины с объекта на объект

$$k_{13} = T_{\tau} / (T_{\tau} + T_{13}) = 1 / (1 + t_{\text{пр } 13} / t_{13}),$$

где $t_{\text{пр } 13}$ — средняя продолжительность одной перебазировки; t_{13} — средняя периодичность между перебазировками.

Признак качественной работоспособности отражает возможности машины по качеству выполнения технологического процесса. Показателем качества выполнения технологического процесса выступают:

1) точность, как способность машины обеспечивать соответствие поля рассеивания значений показателя качества полю допуска и его расположению

$$k_{\tau} = \omega_{\rho} / \delta,$$

где ω_{ρ} — поле рассеивания контролируемого параметра соответствующей выборки; δ — поле допуска;

2) стабильность, как способность машины обеспечивать постоянство распределения вероятностей параметров ее продукции в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне

$$k_{\epsilon} = k_{\tau}(t_2) / k_{\tau}(t_1),$$

где $k_{\tau}(t_2)$, $k_{\tau}(t_1)$ — показатели точности для периода времени t_2 и t_1 соответственно.

Признак ресурсопотребности связан с показателями: затрат трудовых ресурсов; основных и оборотных фондов; затрат денеж-

ных средств и металла; затрат материальных ресурсов и электроэнергии.

Затраты ресурсов связаны с наработкой машины, поэтому уместно использовать удельные показатели, отнеся затраты к единице наработки.

За календарный промежуток времени удельные затраты $Z_{\text{ти}}$ складываются: из $Z_{\text{ти}1}$ — затрат труда на непосредственное использование машины по назначению, включая труд рабочих, управляющих машиной и обслуживающих ее; из $Z_{\text{ти}2}$ — затраты труда на устранение дефектов в работе, допущенных машиной; из $Z_{\text{ти}3}$ — трудовых потерь вследствие простоев, обусловленных качеством машины (технологические и технические отказы, остановки из-за непригодности машины к природно-климатическим условиям, перерывов на отдых из-за невысоких эргономических показателей); из $Z_{\text{ти}4}$ — затраты труда административно-управленческого и обслуживающего персонала. Таким образом

$$Z_{\text{ти}} = Z_{\text{ти}1} + Z_{\text{ти}2} + Z_{\text{ти}3} + Z_{\text{ти}4}.$$

Трудозатраты $Z_{\text{ти}1}$ можно найти из выражения

$$Z_{\text{ти}1} = \bar{C}_y + \bar{C}_o k_o,$$

где $\bar{C}_y$ — число рабочих, постоянно занятых управлением машиной; $\bar{C}_o$ — численность звена рабочих, обеспечивающих работу машины; k_o — коэффициент, зависящий от числа машин, обслуживаемых звеном рабочих ($k_o \leq 1$).

Трудозатраты $Z_{\text{ти}2}$ могут быть найдены из выражения

$$Z_{\text{ти}2} = (t_{y.d}/t_d) (\bar{C}_y + \bar{C}_{\text{пр}}),$$

где t_d — средняя наработка между дефектами, подлежащими устранению; $t_{y.d}$ — среднее время устранения одного дефекта; $\bar{C}_{\text{пр}}$ — количество неработавшего персонала, в том числе машинистов.

Потери труда $Z_{\text{ти}3}$ определяются по формуле

$$Z_{\text{ти}3} = Z_{\text{ти}3.1} + Z_{\text{ти}3.2},$$

где $Z_{\text{ти}3.1}$ — потери труда персонала, управляющего машиной; $Z_{\text{ти}3.2}$ — потери труда персонала, обслуживающего простаивающие машины.

При этом

$$Z_{\text{ти}3.1} = \sum_{i=1}^4 (t_{\text{п}i} \mu_i \bar{C}_i d_i / t_{\text{н}i});$$

$$Z_{\text{ти}3.2} = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^4 (t_{\text{п}i} \mu_{ij} \bar{C}_{ij} d_{ij} / t_{\text{н}ij}),$$

где $t_{\text{п}i}$ — среднее время одного простоя машины i -го вида; $t_{\text{н}i}$ — средняя наработка между простоями i -го вида в часах рабочего времени; μ_i — доля простоев, приходящаяся на плановое время;

d_i — часть простоя машины, в течение которого рабочие не использовались на других работах; $Ч_i$ — среднее число неработающих рабочих в течение i -го простоя машины; l — число одновременно простаивающих взаимосвязанных машин (за исключением рассматриваемой).

Трудозатраты $З_{\text{ти.4}}$ определяются по формуле

$$З_{\text{ти.4}} = (Ч_y + Ч_o k_o) k_{\text{пр}} k_{\text{см}} T_{\text{пол}} / T_p,$$

где $k_{\text{пр}}$ — отношение числа административно-управленческого и обслуживающего персонала к числу рабочих, занятых управлением и обслуживанием машин; $k_{\text{см}}$ — коэффициент сменности; $T_{\text{пол}}$ — средний полезный фонд рабочего времени административно-управленческого и обслуживающего персонала.

Удельные затраты топлива $З_{\text{топ}}$ за календарный промежуток времени использования машины по назначению складываются из затрат топлива при использовании машины по назначению ($З_{\text{топ1}}$), потерь топлива из-за простоев машины в течение планируемого времени ($З_{\text{топ2}}$), потерь топлива в связи с включением двигателя в межсменное время ($З_{\text{топ3}}$). Таким образом,

$$З_{\text{топ}} = З_{\text{топ1}} + З_{\text{топ2}} + З_{\text{топ3}}.$$

Здесь $З_{\text{топ1}} = [(Q_p T_{\text{раб}} / T_p) + (Q_x T_x / T_p) + (Q_o T_o / T_p)] \lambda$, где Q_p , Q_x , Q_o — соответственно часовой расход топлива на рабочем режиме, на холостом ходу и на остановках; $T_{\text{раб}}$, T_x , T_o — соответственно продолжительность работы двигателя за время работы машины на рабочем режиме, холостом ходу и остановках; λ — коэффициент, учитывающий дополнительные потери топлива при хранении, транспортировке, заправке и др.

Цели проектирования и признаки объекта вступают в бинарные отношения. Описание, включающее цели и признаки, ранее было названо концептуальным. Оно сводится к построению подмножества признаков, элементы которого вступают в бинарные отношения с элементами выбранного подмножества целей (A_0). На языке математической логики это выражается следующим образом:

$$P_{\text{одf}} = (\langle p \rangle (\vee a) [(a, p) \in \Phi \wedge a \in A_0]).$$

В настоящее время процедура определения основных признаков выполняется опытным конструктором, хорошо ориентирующимся в признаковом пространстве объектов конкретной области техники, и совмещается с разработкой технического задания.

Обратимся к примеру. Выберем признаки, которым должна отвечать машина для разработки щелей в мерзлом грунте, с учетом определенных ранее целей проектирования. Начнем с целей на уровне заказчика. Снижение себестоимости разработки грунтов связано со следующими подмножествами признаков объекта проектирования: показатели надежности и технологичности, характеристики условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, показатели экономичности. Среди показателей надеж-

ности следует особо обратить внимание на долговечность: гамма-процентный ресурс, назначенный ресурс, средний ресурс до капитального ремонта. Кроме того, следует учитывать и показатели безотказности и ремонтпригодности.

Среди показателей технологичности следует учитывать себестоимость профилактического обслуживания и ремонта объекта. Из признаков, характеризующих условия эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, главными для снижения себестоимости разработки мерзлых грунтов следует считать продуктивность и ресурсопотребляемость; среди показателей экономичности — себестоимость единицы продукции, срок окупаемости капитальных вложений на изготовление объекта проектирования. Цель внедрения объектов новой техники связана с показателями назначения, категорией качества, характеристиками патентной чистоты и патентной защиты.

Своевременное завершение строительства на объектах может быть достигнуто скорейшей разработкой и внедрением более производительных технических средств, а это во многом определяется показателями технологичности и, в частности, трудоемкостью изготовления по видам работ. Этому же способствует сокращение сроков разработки технических устройств, чему способствует повышение коэффициента унификации и стандартизации изделия и его конструктивных элементов, коэффициента перспективного использования в других изделиях.

Достижение цели улучшения условий и охраны труда обеспечивается улучшением признаков объекта проектирования, характеризующихся показателями эстетичности и эргономичности, экологичности, безопасности работы и обслуживания.

Разработка объектов новой техники, как цель на уровне отдела треста, требует учета показателей назначения, характеристик патентной чистоты и патентной защиты. Обеспечение надежности проектируемого объекта достигается учетом показателей надежности, а обеспечение экономического эффекта на первом году использования новой техники — установлением срока окупаемости капитальных затрат в 1 год.

Цели на уровне кафедры (внедрение результатов научно-исследовательской работы в производство, привлечение студентов к техническому творчеству на реальных проектных разработках) могут быть достигнуты, если объект проектирования будет обладать следующими признаками: достаточная научно-техническая обоснованность, несложность проектирования, подготовки производства и изготовления.

Достижению личных целей (участие в повышении производительности труда в строительстве, моральное удовлетворение от успешно выполненной работы и от признания ее, материальное поощрение за разработку и внедрение новой техники) способствуют: оригинальность технического решения, превосходство показателей технического уровня объекта проектирования над

достигнутым уровнем, возможность реализации технического решения.

Наиболее существенные по мнению конструктора признаки, главным образом измеряемые количественно, включатся в техническое задание на проектирование; другие — учитываются как критерии или критериальные ограничения при выборе наиболее рационального варианта и оптимальных параметров объекта проектирования. Для автоматизированного выполнения процедуры нужно построить полные множества целей и признаков, что должно войти в банк знаний, установить бинарные отношения между элементами этих множеств и производить срез внутри этих отношений по выбранному подмножеству целей A_0 .

Установить признаки объекта на данном этапе проектирования еще не означает выбрать его конструктивное решение. Признаковое пространство достаточно широко для вмещения многих вариантов технического решения, хотя и определяет направление дальнейшего поиска. Так, конструктивные признаки при совершенствовании существующих машин отражают пока лишь общую тенденцию их развития. Если же цель проектирования состоит в создании принципиально новой конструкции, то в концептуальное описание может войти указание на наиболее перспективное направление технических решений, возможные аналоги и т. д.

Признаки, отвечающие наиболее важным целям, назовем основными. Цели проектирования, несмотря на их многообразие, могут быть сведены в группы, соответствующие определенным факторам окружения. Любое техническое изделие предназначается для удовлетворения определенных потребностей человека и общества. Поэтому первую группу целей проектирования можно составить по их принадлежности к социальным факторам окружения. В эту группу следует отнести следующие цели: замена ручного труда механизированным a_1 ; повышение производительности труда a_2 ; улучшение условий труда a_3 ; улучшение эстетических свойств объектов техники a_4 ; достижение приоритета в области техники a_5 .

Кроме перечисленных, в группу целей, связанных с социальным окружением, следует отнести и цели, преследуемые конструкторами в ходе проектирования: успех в социалистическом соревновании a_6 ; материальное поощрение за разработку и внедрение новой техники a_7 ; повышение квалификации конструкторов a_8 ; удовлетворение познавательной потребности a_9 .

Вторую группу составляют цели, относящиеся к научно-техническому окружению: замена устаревших технических систем новыми a_{10} ; использование новых физических принципов a_{11} ; повышение надежности технических систем a_{12} и производительности машин a_{13} ; снижение материалоемкости a_{14} , энергоемкости машин a_{15} ; снижение трудоемкости технического обслуживания a_{16} и периодических ремонтов a_{17} .

Кроме перечисленных целей, достигаемых в ходе эксплуатации, в группу следует включить и цели, преследуемые в ходе разработки объекта, т. е. во время проектирования, технической подготовки, производства и изготовления: снижение сроков разработки объектов a_{18} , объема проектных разработок a_{19} , объема работ по подготовке производства a_{20} и срока изготовления a_{21} .

В группу целей, относящихся к экономическому окружению, можно включить: снижение затрат на проектирование a_{22} , на техническую подготовку производства a_{23} , на изготовление a_{24} , на техническое обслуживание a_{25} , на ремонт a_{26} ; обеспечение народнохозяйственного эффекта a_{27} и срока окупаемости дополнительных затрат a_{28} . С факторами непосредственного окружения связана цель защиты окружающей среды a_{29} .

Бинарные отношения между целями и признаками можно отразить в виде таблицы или матрицы соответствий

$$\|c_i(j)\| = \begin{matrix} & p_1 & p_2 & & p_m \\ \begin{bmatrix} c_1(1) & c_1(2) & \dots & c_1(m) \\ c_2(1) & c_2(2) & \dots & c_2(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_n(1) & c_n(2) & \dots & c_n(m) \end{bmatrix} & \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{matrix} \end{matrix}$$

Строки матрицы соответствуют целям проектирования, а столбцы — основным признакам. В ячейках на пересечении строк и столбцов проставляются +1, —1 или 0 (+1 — означает, что признак соответствует цели, и для ее достижения показатели должны быть увеличены; —1 — признак отвечает цели, показатели должны быть уменьшены; 0 — признак не отвечает цели; знак «+» может быть опущен).

На основании целевого описания и матрицы соответствий можно составить концептуальное описание. Оно включает: выражение потребности проектирования, цели в ранжированной последовательности и признаки, соответствующие основным целям:

$$\tilde{O}P_2 = \{a_0[a_1((p)|(a_1, p) \in \Phi, a_2((p)|(a_2, p) \in \Phi, \dots, a_n((p)|(a_n, p) \in \Phi)]\}. \quad (3.3)$$

Алгоритм выполнения процедуры выбора основных признаков может быть представлен следующим образом. Матрица соответствий составляет информационный массив МЗ. Обращаясь к этому массиву, конструктор просматривает включенные в него цели и помечает те из них, которые соответствуют целям, вошедшим в целевое описание. Если близкой по смыслу цели не окажется, то необходимо просмотреть все множество признаков и отобрать (пометить) те из них, которые отвечают рассматриваемой цели. Исходными данными для выполнения процедуры являются компоненты целевого описания. При этом выражение потребности проектирования определяет признаки назначения, а остальные

выбираются из матрицы соответствий. Назовем в концептуальном описании признаки назначения головной частью, а все остальные — хвостовой. Содержание головной части носит предметно-ориентированный характер, по форме же она может быть организована по общей, независимой от предметной области структурной схеме

$$b_1 \in B_1 \times B_2.$$

Здесь $B_1 = \{\text{УЛУЧ.}, \text{СОЗД.}, \text{ОБЕС.}\}$; $B_2 = \{\text{МАШ} - D, \text{УСТ.} - D, \text{СТАН.} - D, \text{ОБОР.} - D, \text{ПРОЦ.} - D\}$, где

УЛУЧ. — улучшить; СОЗД. — создать; ОБЕС. — обеспечить; МАШ. — машина; УСТ. — установка; СТАН. — станок; ОБОР. — оборудование; ПРОЦ. — процесс; D — множество идентификаторов, присвоенных различным видам машин, установок, оборудованию, процессам в данной предметной области техники.

Схема алгоритма составления концептуального описания представлена на рис. 3.9. Символу 2 соответствует операция выделения подмножества целей A_0 из полного множества, предусмотренного программой; символу 3 — ввод дополнительных целей, включаемых в подмножество A_0 пользователем; символу 4 — выполнение предопределенного процесса выбора упорядоченных пар из элементов подмножества A_0 и множества признаков P , предусмотренного программой (в данном случае используется матрица соответствий, позволяющая для элементов A_0 , заложенных в программе, находить отвечающие им признаки автоматически: для дополнительных целей эта операция выполняется пользователем просмотром всего множества признаков), символу 5 — преобразование данных в форму концептуального описания.

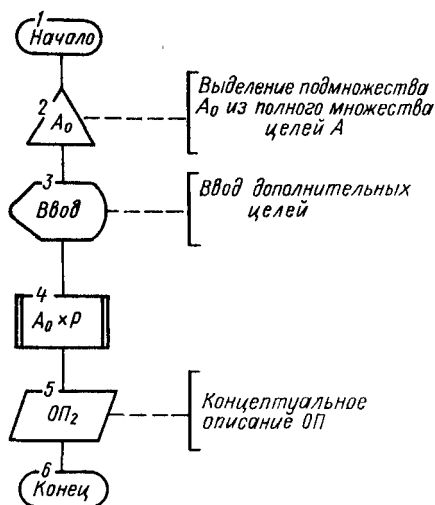


Рис. 3.9. Схема алгоритма составления концептуального описания

3.5. СОСТАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Система автоматизированного проектирования и автоматизации производства в будущем изменит форму конструкторской документации. Отпадет необходимость представления ее в виде текстов и чертежей на бумаге. Техническое задание на проектирование составит концептуальное описание объекта на каком-либо магнитном носителе.

Наличие Государственного стандарта на порядок построения, изложения и оформления технического задания (ГОСТ 15.001—73*) делает возможным использование ЭВМ не только для выполнения отдельных процедур этой изначальной стадии проектирования, но и для составления текста ТЗ. Как отмечалось в п. 3.1 ТЗ должно содержать обязательный перечень разделов, наименование которых предусмотрено стандартом, а содержание зависит от вида, назначения, условий производства и эксплуатации продукции.

Анализ технических заданий, выполненных в ряде проектных организаций, дал возможность выделить в них три вида информации: постоянную, исходную и переменную. Постоянная информация связана с конкретной областью техники, определяющей специализацию проектной организации. Она остается неизменной независимо от объекта проектирования. К ней относятся указания: на необходимость соблюдения действующих в данной области техники стандартов, на порядок согласования, контроля и приемки и т. д. Технические задания на однотипную продукцию содержат, как правило, одинаковую структуру предложений внутри одноименных разделов. Это тоже можно отнести к постоянной информации. В общем объеме технического задания на традиционную для проектной организации продукцию постоянная информация занимает больше половины. Исходная информация для ТЗ определяется заявкой на разработку. Она может содержать технико-экономические требования к продукции, лимитную цену, объем потребности в продукции и другие данные. К исходной информации можно отнести и некоторые сведения, известные разработчику до составления ТЗ. Это, например, наименование предприятия изготовителя, должности и фамилии лиц, согласующих и утверждающих ТЗ, и многое другое. Для примера рассмотрим одно из предложений технического задания, составленного во ВНИИЗеммаше на разработку экскаватора ЭТЦ-252А.

«Экскаватор предназначен для разработки траншей прямоугольного и трапецеидального сечения в условиях умеренного климата». Для конструкторского отдела, занимающегося проектированием многоковшовых траншейных экскаваторов, выделенное курсивом в предложении словосочетание образует постоянную информацию, остальные — исходную.

Переменная информация самым непосредственным образом связана с объектом проектирования. Она образуется в ходе преобразования исходной информации при выполнении процедур определения потребности в проектировании, выбора целей и признаков объекта.

Прежде всего конструктор должен убедиться, что заявленный объект действительно нужно проектировать. Для этого проводятся специальные предпроектные исследования, в ходе которых выполняется процедура определения потребности проектирования. Программный комплекс, реализующий алгоритм процедуры, позволит обращением к базе данных найти аналог объекта или убедиться

в его отсутствии, напомним конструктору о условиях, при которых целесообразно развертывать сложный и трудоемкий процесс проектирования.

Организовать разработку ТЗ с помощью ЭВМ лучше всего в диалоговом режиме. В программном комплексе следует предусмотреть последовательный вывод на экран видеотерминала постоянной информации начиная с титульного листа. По мере необходимости производится запрос исходной информации, которую должен ввести пользователь (конструктор). Для получения переменной информации управляющая программа комплекса вызывает по согласованию с пользователем программы выполнение соответствующих процедур.

Рассмотрим разработку основных разделов технического задания в диалоге с ЭВМ: «Наименование и область применения (использования)», «Основание для разработки», «Источники разработки», которые содержат лишь постоянную и исходную информацию. Алгоритм их выполнения ограничивается применением операторов ввода и вывода. При выполнении раздела «Цель и назначение разработки» конструктор может воспользоваться процедурой выбора целей. В ходе диалога ЭВМ подскажет конструктору основные цели проектирования, затрагивающие интересы общества на разных иерархических уровнях, поможет оценить важность целей с учетом их взаимосвязей. При этом конструктор не только соглашается или не соглашается с предложениями ЭВМ, но и вносит новые цели, устанавливает взаимосвязь между ними, корректирует их веса с точки зрения важности.

Выполнение раздела «Технические требования» — наиболее важный и ответственный этап составления ТЗ. Технические требования определяют признаки будущего объекта. В данном случае конструктору предлагается воспользоваться процедурой выбора признаков. Программа, реализующая эту процедуру обратится к базе знаний, представленной в виде матрицы соответствий, и выберет из нее признаки, отвечающие поставленным целям проектирования. Если же в ТЗ включаются цели не вошедшие в базу знаний, то конструктору будет предложено просмотреть все множество признаков, из которых он сам выберет отвечающие вводимым целям. Программа предусматривает расчет показателей, требующих вычислений, представление признаков в форме требований к объекту проектирования, предусмотренных основными подразделами ТЗ, а также вывод и ввод запросов ЭВМ и ответов конструктора. Ряд технических требований в определенной области техники остаются неизменными независимо от объекта проектирования и поэтому входят в постоянную информацию. При выполнении подраздела «Требования к категории качества» предусматривается обращение к процедуре оценки технического уровня и качества продукции.

Процедура включает следующие операции: выбор аналога, базового и перспективного образца и номенклатуры показателей

качества; определение численных значений показателей качества; сравнение показателей качества с соответствующими базовыми показателями, получение относительных показателей качества; определение комплексного показателя качества с учетом весомости единичных показателей; проверку соответствия показателей качества установленным требованиям.

В результате объект проектирования относят к одной из двух категорий качества: высшей или первой.

За аналог для сравнения принимается изделие, производимое у нас в стране или за рубежом, сходное по функциональному назначению и условиям применения с объектом проектирования.

Аналог в случае выполнения процедуры определения потребности проектирования к моменту составления технического задания уже определен. Если же эта процедура не выполнялась, то следует обратиться к базе данных по существующим образцам в соответствующей области техники. Основой для выбора аналога помимо функционального назначения служит главный параметр. Под ним понимается показатель от величины которого зависит наибольшее число других основных параметров. Так, для одноковшового экскаватора главным параметром считается вместимость ковша. Главный параметр аналога может отличаться от этой величины для объекта проектирования не более, чем на 20. %. При наличии нескольких аналогов для сравнения выбирается лучший из них по комплексному обобщенному показателю. Если же аналога нет, то сопоставление объекта проектирования ведется по показателям качества перспективного образца. Под перспективным образцом понимается параметрическое и структурное описание наиболее вероятного варианта машины, составленное на основе сценария развития объектов в данной области техники.

Составление сценария можно представить в виде самостоятельной процедуры. В автоматизированном режиме ее выполнения конструктору должна быть представлена возможность обратиться к базе знаний по основным факторам окружения объекта проектирования. В программный комплекс выполнения процедуры следует включить средства для получения прогнозной информации на установленный в данной области техники период упреждения. Спрогнозировав изменение факторов окружения и установив тем самым выдвигаемые ими требования, можно определить значения основных показателей объекта проектирования, удовлетворяющих эти требования.

В карту технического уровня включаются следующие показатели.

1. Показатели назначения: функциональные и технической эффективности (производительность, мощность, грузоподъемность, скорость и т. д.); конструктивные (масса, габариты и т. д.); состава и структуры.

2. Показатели надежности: безотказности (вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ и т. д.); долговеч-

ности (средний ресурс, назначенный ресурс, гамма-процентный ресурс и т. д.); ремонтпригодности (время восстановления работоспособного состояния); сохраняемости (средний срок сохраняемости и т. д.).

3. Показатели экономного использования (сырья, материалов, топлива, электроэнергии).

4. Показатели, характеризующие ограничения вредных воздействий продукции (эргономические, экологические и показатели безопасности).

5. Показатели стандартизации и унификации (коэффициент применяемости, коэффициент повторяемости, коэффициент межпроектной унификации и т. д.).

Номенклатура основных показателей технического уровня и качества продукции составляет постоянную информацию для составления карты технического уровня. Кроме того, программный комплекс выполнения процедуры должен дать возможность конструктору вносить дополнительные показатели из числа тех, которые соответствуют установленным ранее признакам объекта проектирования.

Следующим этапом за выбором номенклатуры показателей технического уровня и качества объекта проектирования выступает их численная оценка. Некоторые из показателей уже имеют количественное выражение, вытекающее из заявки на проектирование или из значений признаков, установленных на этапе их выбора в соответствии с целями проектирования. Другие должны быть установлены в ходе выполнения операции.

В автоматизированном режиме для оказания помощи конструктору на видеотерминал выводятся последовательно показатели, подлежащие числовой оценке, и некоторые рекомендации для выполнения этой работы. В частности для показателей, оцениваемых в баллах, должна быть предоставлена возможность ознакомиться с таблицей, включающей характеристики показателя и соответствующие им оценки в баллах.

Получив численные оценки показателей технического уровня и качества объекта проектирования, аналога и перспективного образца можно перейти к следующей операции — определению относительных значений единичных показателей. Они устанавливаются на основе отношения 1) $D_i = p_i/p_{ia}$ или 2) $D_i = p_{ia}/p_i$, где D_i — относительное значение i -го единичного показателя; p_{ia} — численное значение показателя для аналога или перспективного образца; p_i — значение этого же показателя для объекта проектирования.

Выбор соотношения 1 или 2 для расчета зависит от характера показателя. Если повышение технического уровня и качества объекта проектирования связано с повышением его значения, то принимается отношение 1, в противном случае — 2. При отсутствии аналога (перспективного образца) или при невозможности установить значение его отдельных показателей сравнение

производят по данным нормативно-технической документации.

Относительное значение показателей, изменяющихся в определенном диапазоне, устанавливаются по крайним их величинам.

Получив относительные оценки переходят к операции определения комплексного обобщенного показателя на основе выражения

$$K_k = \sum_{i=1}^n m_i D_i,$$

где m_i , $i = \overline{1, n}$ — коэффициент весомости i -го относительного показателя качества.

Значение m_i выбирается в долях единицы так, что $m_1 + m_2 + \dots + m_n = 1$ и зависит от важности показателя для оценки технического уровня и качества объекта проектирования. Весомость показателей устанавливается экспертным методом или с помощью нормирующей функции с учетом особенности продукции в данной области техники.

Завершается процедура сравнением полученного значения с допустимым для установленной категории качества. Так, в землеройном машиностроении для изделий высшей категории качества диапазон изменения комплексного обобщенного показателя установлен пределами: по аналогу $K_k \geq 1,05$; по перспективному образцу $1 > K_k \geq 0,95$. Для первой категории качества: по аналогу $1,05 > K_k \geq 0,95$; по перспективному образцу $0,95 > K_k \geq 0,85$.

Если комплексный показатель не удовлетворяет пределам (особенно нижнему), необходимо внести коррективы в значения единичных показателей объекта проектирования и вновь выполнить операции по определению относительных значений и комплексного показателя.

Форму карты технического уровня и качества продукции необходимо представить в форматах, соответствующих требованиям ГОСТ к этому документу. Для выполнения раздела «Экономические показатели» можно воспользоваться специальной программой, реализующей принятый в организации алгоритм расчета ориентировочной эффективности и срока окупаемости затрат на разработку и освоение производства продукции, лимитной цены и др.

В разделах «Стадии и этапы разработки» и «Порядок контроля и приемки» содержится в основном постоянная и исходная информация. В завершении программы составления текста ТЗ следует предусмотреть вывод на печать в форматах, соответствующих требованиям ГОСТ 15.001—73*.

Глава 4. ПРОЦЕДУРЫ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ

4.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Техническое предложение — это совокупность конструкторских документов, разработанных на основе технического задания и содержащих выбор вариантов возможных решений и отыскание среди них оптимального.

Поиск вариантов технических решений выполняет инженер-конструктор. Однако уже на этой стадии целесообразно привлекать к работе над проектом инженеров-технологов и художников-конструкторов.

Технологи, участвуя вместе с конструкторами в выборе вариантов, заботятся о лучших предпосылках для использования рационального членения и компоновки будущей конструкции, лучших предпосылках для использования стандартных и унифицированных узлов, типовых технологических процессов, ограничении номенклатуры конструкционных материалов. Художник-конструктор формирует требования технической эстетики и эргономики, разрабатывает варианты художественно-конструкторского решения.

В техническом предложении отражаются результаты исследований по проверке патентной чистоты выбранного варианта технического решения как в СССР, так и в странах, предполагаемых для экспорта. В число обязательных документов технического предложения входят пояснительная записка и ведомость технического предложения. В зависимости от характера, назначения или условий производства объекта могут выполняться дополнительно: чертеж общего вида или габаритный чертеж, схемы, таблицы, расчеты, патентный формуляр.

Исходя из содержания технического предложения на этапе его разработки выделено три основные процедуры: поиск вариантов технических решений, выбор оптимального варианта и анализ принятого решения.

4.2. ПОИСК ВАРИАНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КАК ТВОРЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

На входе процедура поиска возможных технических решений имеет цели проектирования и основные признаки, а выходом ее должны стать варианты достижения поставленных целей, т. е. варианты проектируемого объекта. Этот этап проектирования в наибольшей степени носит творческий характер. В данном случае наглядно проявляются способности конструктора к изобрета-

тельству. О том, что такое изобретательство, какие черты интеллекта ему способствуют, описано в работах [20, 21, 57, 58].

К изобретательству наиболее склонны люди с хорошо развитым ассоциативным мышлением. Поиск возможных технических решений весьма увлекательный и в то же время напряженный процесс. Многим конструкторам он доставляет интеллектуальное наслаждение, подобное тому, какое испытывает любитель шахматной игры. Мозг такого человека находится в состоянии творческого поиска даже в те моменты, когда сам человек занят совершенно другим делом. Конструктор знает, что то или иное техническое решение может возникнуть в его сознании совершенно неожиданно. Часто это бывает в транспорте, нередко в кино или театре, бывали случаи — и во сне. Разгадка механизма творчества — неотъемлемое условие создания искусственного интеллекта. На заре технического творчества поиск конструктивного решения всецело относился к области искусства. В настоящее время этот процесс все ближе примыкает к науке. Использование систематизированных и обобщенных знаний в поиске технических решений — характерная черта современного проектирования. Знания нужны не для того, чтобы освободить человека от творчества, а для того, чтобы сделать его более целенаправленным. Стремление к сокращению сроков проектирования не позволяет надеяться на спонтанное озарение, его нужно стимулировать. Нередки случаи, когда наиболее удачный вариант технического решения возникал в конце разработки и уже не мог быть использован.

Необходимо определенными приемами обеспечить появление наилучшего варианта на соответствующем этапе проектирования — этапе поиска возможных решений. Одним из таких приемов является многовариантность технического решения. «Чем больше идей — тем лучше», — так совершенно справедливо характеризуют этот этап проектирования. Сейчас, в эпоху научно-технической революции, в техническом творчестве участвуют миллионы специалистов. Вероятность того, что той же самой проблемой, которая стоит перед конструктором, занимались или занимаются другие, весьма велика. В этих условиях становится необходимым прежде, чем приступить к разработке вариантов, ознакомиться с тем, что уже в этом направлении сделано, т. е. собрать необходимую информацию.

Нередко можно слышать от студентов, впервые приступивших к выполнению курсового проекта по специальным дисциплинам, о том, что им не удается найти необходимую литературу. Опытные же конструкторы порой жалуются на то, что им не хватает времени на освоение потока информации по их проблеме.

В области изобретательского дела бытует понятие «обычного проектирования», под которым понимается решение известной задачи для достижения известной цели, осуществляемое известными путями или способами с помощью известных средств, т. е.

при обычном проектировании специалисту известны задача, цель, способ и средство решения. Попытка отыскать пример такого рода деятельности приводит к тому выводу, что в охарактеризованных условиях протекает «проектирование» лишь в одном случае — при выполнении курсового проекта нерадивым студентом. Ему известна задача — задание выдал преподаватель. Цель также ясна — «спихнуть» проект. Способ — отыскать аналогичное задание у другого студента. Средство решения — перечерчивание и переписывание. Если же не уподобиться такому студенту, то обычное проектирование всегда связано с неопределенностью в постановке целей, с поиском наиболее рациональных способов и средств решения. Очевидно, специалисты в области изобретательского дела понимают под «обычным проектированием» проектирование нового образца внутри типоразмерного ряда. Действительно, в этом случае конструктор может воспользоваться известным конструктивным решением, примененным в базовом изделии. Однако практика показала, что, во-первых, унифицированные сборочные единицы составляют в изделиях внутри типоразмерного ряда не более 50 % от всех сборочных единиц, а, во-вторых, любое количественное изменение того или иного параметра, особенно главного, в подавляющем большинстве случаев приводит к качественно новым техническим решениям если не для всего изделия, то по крайней мере для одного из его составляющих. Надо отдать должное специалистам в области изобретательского дела в понимании этого момента. На практике, утверждают они, не всегда вся целиком разработка может быть признана изобретением. Изобретение обычно скрыто в разработке, его надо уметь найти.

Несомненно, что цели изобретателя и проектировщика различны. Если первый стремится найти новое техническое решение, не всегда заботясь о возможности его реализации в настоящее время, то второй может положить в основу создаваемого изделия лишь то решение, которое определенно сулит положительный эффект и может быть реализовано. Конечно, такое противоречие в целях не противопоставляет конструктора изобретателю. В нашей стране нет профессии изобретатель. Изобретателем может быть человек любой профессии, в том числе и конструктор. Более того, конструктор, принимающий участие в разработке вариантов технического решения, невольно сталкивается с изобретательством. Однако определенную опасность для результатов общей работы может составить специалист, чрезмерно увлеченный изобретательством, как впрочем и тот, кто стремится к «обычному проектированию» в том понимании, о котором говорилось ранее.

Несмотря на то, что поиск технических решений при разработке вариантов изделия относится к сфере творчества, многие опытные конструкторы прибегают к некоторым организационным приемам для систематизации своей работы. В современной литературе можно найти многочисленные тому примеры.

4.3. ОРГАНИЗАЦИЯ ПОИСКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Известные в настоящее время приемы и методы поиска технических решений по степени формализации делят на три группы [1]: 1) неформализованные эвристические приемы и методы, состоящие из набора эвристик; 2) частично формализованные эвристические методы-эвритмы, часть операций в которых описана в виде алгоритмов; 3) полностью формализованные приемы и методы-алгоритмы.

Названные группы весьма отличаются по численности входящих в них приемов и методов. Наиболее многочисленна первая группа. Она включает как общие (инвариантные) методы, применимые к объектам любой техники, так и частные, относящиеся к определенному классу технических систем и их элементов.

Полностью формализованные методы (алгоритмы) составляют самую малочисленную группу и относятся лишь к конкретным объектам техники. Однако с развитием методики проектирования все большее число методов приходит из первой группы во вторую и из второй в третью. Автоматизированное проектирование строится на второй группе методов, а автоматическое — на третьей.

Эвристические методы рождаются в результате анализа уже выполненных проектных разработок. Некоторые из них являются сугубо индивидуальными, связанными с образом мышления конкретной личности. Передаваемые от учителей к ученикам, они зачастую не приносят последним тех результатов, которых добился учитель. Другие приемы и методы несомненно полезны всем, помогают преодолеть инерцию мышления, служат ориентирами в поиске технических решений.

Эвристические приемы. Они означают указание на то, как преобразовать имеющееся техническое решение для получения искомого. Большинство эвристических приемов включает две части. Первая — отвечает на вопрос «что изменить», вторая — «как изменить». Первая часть может содержать несколько переменных, а вторая — несколько способов их изменения. Поэтому приемы зачастую содержат несколько поисковых шагов. В работе [1] приведен перечень эвристических приемов, названный межотраслевым фондом. Всего он содержит 258 приемов, объединенных в 15 групп. Начинающему конструктору рекомендуется освоить от 50 до 100 приемов, отредактировать и конкретизировать их с ориентацией на рассматриваемый класс объектов. Полученный таким образом индивидуальный фонд можно пополнить в дальнейшем на основе собственного опыта и изучения соответствующего патентного фонда. При поиске технических решений, используя эвристические приемы, следует выполнить следующее: 1) уяснить цели проектирования, изложенные в техническом задании, и составить список признаков искомого технического решения; 2) выбрать из известных технических решений (если оно не

задано) один или несколько прототипов, в наибольшей степени отвечающих списку признаков; 3) проанализировать прототипы, выявив несоответствие их признаков с искомым решением; 4) в соответствии с признаками, подлежащими изменению, выбрать наиболее подходящий прием из общего (межотраслевого) или индивидуального фонда, если он уже создан.

Следует иметь в виду, что зачастую задачу можно решить не сразу, а последовательно, улучшая результаты с помощью различных приемов. Метод эвристических приемов наиболее прост в освоении. С него следует начинать обучение студентов проектированию. Примеры использования его можно найти в [1].

Уместно отметить, что метод поиска технических решений с помощью эвристических приемов отражает идею «общего решателя задач». Как там, так и здесь, имеется некоторый объект (прототип), к которому применяется преобразование (эвристический прием), после чего полученный результат сравнивается с целевым.

Метод гирлянд ассоциаций. В некоторых случаях, когда цель проектирования определяет единственный признак объекта — новизну, можно воспользоваться методом гирлянд ассоциаций. Для этого объекту подбираются синонимы (если это возможно), а затем случайным образом называют другие объекты и составляют комбинации из тех и других. Каждую пару объектов дополняют тем или иным признаком случайного объекта или ассоциациями, которые они вызывают. Основной смысл метода заключается в том, чтобы «расшатать» устоявшиеся представления об объекте. Конечно же подавляющее большинство комбинаций — объект (синоним), признаки и ассоциации — окажутся абсурдными. Однако, как утверждает в [1], на практике 10—15 % комбинаций составляют интересные идеи.

Мозговой штурм. Метод организует коллективную работу конструкторов. Руководитель (главный конструктор) собирает группу специалистов, как правило не более 10 человек, и ставит перед ними задачу поиска технических решений; удовлетворяющих определенным признакам. Каждый участник сеанса мозгового штурма, продолжающегося не более одного часа, может высказать любые идеи. Анализ и критика их во время сеанса не допускается. Основной девиз — чем больше идей — тем лучше. Если в ходе сеанса, по мнению руководителя, высказано мало идей, то он может быть повторен, возможно с другим составом специалистов. Все высказывания стенографируются или записываются на магнитную ленту.

Синектика. Метод подобен мозговому штурму и отличается от него только тем, что основная задача сводится к обсуждению одного-двух вариантов технических решений, но с детальным их рассмотрением. В число группы включаются специалисты различных профессий.

Метод идеального объекта. Прежде, чем отыскать реальные технические решения, рекомендуется пофантазировать, предста-

вить себе «идеальное» решение поставленной задачи. Самым идеальным будет такое решение, при котором ни проектировать, ни создавать объект не нужно, и в то же время вызывающая его потребность окажется удовлетворенной. В такой постановке задача уже ставилась на первом этапе проектирования. Если же все-таки нужно что-то создавать, то лучше это сделать самым «простым» образом.

Скажем, для перемещения предложить ковер-самолет, для обслуживания посетителей в заведениях общественного питания — скатерть-самобранку. Конечно полет фантазии должен быть ограничен пределами осуществимого. Так, в примере с разработкой мерзлых грунтов «идеальным» можно считать такое техническое решение, которое делает работу в мерзлых грунтах хотя бы такой же трудоемкой и энергоемкой, как в талых.

Выбрав идеальный объект или способ удовлетворения потребности, в дальнейшем надлежит установить препятствия к их реализации. В борьбе с этими препятствиями и следует построить поиск технических решений. Изложенный метод несомненно организует поиск. Однако представление идеального способа достижения цели в некоторых случаях и составляет основную трудность.

Морфологический анализ. Рассмотренные до сих пор приемы и методы относятся к первой группе по степени формализации. Морфологический анализ включает операции, выполняемые алгоритмически, и, следовательно, принадлежит ко второй. Сущность его состоит в расчленении общей функции проектируемого объекта на частные и в отыскании возможных способов их выполнения. То или иное сочетание способов выполнения всех частных функций и составляет вариант технического решения. Для лучшей организации работы по этому методу можно воспользоваться таблицами приемлемости.

Форма, удобная для разработки вариантов проектируемого объекта, представлена в виде табл. 4.1. В ней указываются общая и частные функции, а также средства выполнения частных функций.

При этом

$$x_k = \bigcap_{i=1}^n u_{ij}; \quad k = \overline{1, m}; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, l}, \\ x_k \in X \quad u_{ij} \in U_i$$

где x_k — элемент множества технических решений; X — полное множество технических решений; u_{ij} — средство j выполнения функции i ; U_i — множество средств выполнения функции i .

Единицы в ячейках на пересечении строк и столбцов таблицы означают использование того или иного средства для выполнения частной функции в данном варианте технического решения.

Нужно отметить, что морфологический анализ — весьма действенный метод. Автор имел возможность убедиться в этом во время

Таблица разработки вариантов технического решения

Частная функция u_1				Частная функция u_2			...	Частная функция u_n			Общая функция Y
u_{11}	u_{12}	...	u_{1l_1}	u_{21}	...	u_{2l_2}	...	u_{n1}	...	u_{nl_n}	
	1							1			x_1
1				1		1				1	x_2
1				1				1			x_m

занятий по дисциплине «Введение в специальность». На практическом занятии студентам ~~объявлялось~~, например, — сейчас мы будем отыскивать ~~новые~~ технические решения машины для очистки щебеночного балласта железнодорожного пути. Такая постановка задачи вызвала у многих учащихся, а это были студенты первого курса, по меньшей мере, недоумение. Какие там новые технические решения, когда и старые-то неизвестны, и как это можно их отыскивать? Лишь небольшое число студентов (выпускников техникумов) относились к задаче с некоторым пониманием. Им-то и предлагалось обрисовать существующее положение. Они рассказывали своим товарищам, что щебеночный балласт железнодорожного пути придает ему упругие и дренирующие свойства, что со временем пустоты между частицами щебня заполняются загрязнителями различного происхождения и это повышает жесткость пути и ухудшает дренаж.

Периодически, во время среднего или капитального ремонта пути, балластный слой очищается. В нашей стране, где путевые работы обладают по сравнению с другими странами самым большим объемом и интенсивностью, в настоящее время применяются щебнеочистительные машины, использующие центробежный грохот. Работа его заключается в следующем. Загрязненный щебеночный балласт вырезается и подается на сетчатую ленту, движущуюся по замкнутой криволинейной траектории со скоростью около 10 м/с. Центробежные силы, действующие на перерабатываемый материал, выбрасывают частицы, которые могут пройти отверстия в сетке, они-то и составляют загрязнители. Очищенный материал вновь укладывается в путь. Работы могут выполняться как без снятия, так и при снятии путевой решетки.

Студенты, выслушав такое сообщение, принимали его к сведению, но новых технических решений не предлагали, полагая задачу с очисткой щебеночного балласта решенной. Тогда преподаватель дополнял разъяснение. Он говорил, что щебеночный

материал обладает высокой абразивностью, в балласте могут быть посторонние включения — валуны, элементы верхнего строения пути (подкладки, костыли и др.), и все это вызывает быстрый износ металлической сетчатой ленты, ее хватает в лучшем случае на 10 км пути; что существующие устройства для вырезки загрязненного балласта не могут справиться со всей его толщиной, а это приводит к очистке лишь верхнего слоя балластной призмы. После этого наступало некоторое оживление в аудитории. Стали высказываться предложения повысить долговечность сетки заменой ее, например на резиновую, давались некоторые предложения и по улучшению вырезных устройств. Однако обсуждение не выходило за рамки существующего способа очистки. Вот тогда-то и предлагалось использовать морфологический анализ. Совместно выделялись частные функции щебнеочистительной машины: вырезка щебеночного балласта; перемещение его к месту очистки, очистка, удаление загрязнителя, укладка очищенного щебня в путь, собственное перемещение машины. Составлялась в форме таблицы матрица приемлемости и предлагалось высказать соображения по поводу средств для выполнения частных функций. Вот тут уже активность резко повышалась. Предлагалось, например, вырезку производить потоком сжатого воздуха, потоком жидкости, вообще не вырезать; перемещать к месту очистки — транспортерами, по лотку, в потоке воздуха или жидкости, метанием, вообще не перемещать; очищать — протиркой каждой частицы тряпкой, обдувкой воздухом, промывкой на плоском грохоте, на плоском грохоте с продувкой, отсосом загрязнителей и т. п.; удалять загрязнитель — транспортером, отбросом, брекетированием, сжиганием, складированием; укладку очищенного щебня в путь — транспортером, лотком, аэрожелобом; собственное перемещение машины — по рельсам, по обочине, на воздушной подушке, под землей, по воздуху.

После заполнения таблицы оказывалось, что если составлять варианты технического решения путем различных сочетаний способов выполнения частных функций, то общее число их составляет:

$$N_b = \prod_{i=1}^n k_i, \quad (4.1)$$

где n — число частных функций; k_i — число средств реализации частной функции.

Так, в рассмотренном примере число частных функций равно 6, число средств реализации по первой частной функции (учитываются только названные) — 3, по второй — 6, по третьей — 5, по четвертой — 5, по пятой — 3, по шестой — 5. Подставим в формулу (4.1) значения n и k_i , найдем: $N_b = 6750$ вариантов.

Конечно, часть из них — абсурдны, многие средства выполнения частных функций несовместимы. Однако обычное представление сломлено, появились и интересные варианты. Некоторые

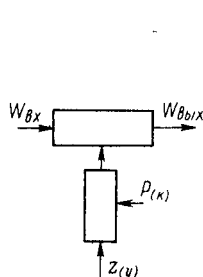


Рис. 4.1. Функциональная схема любого технического объекта

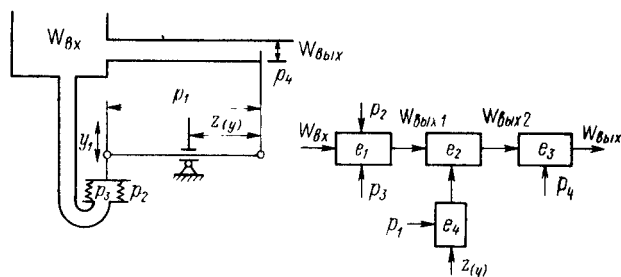


Рис. 4.2. Дифференцированная функциональная схема устройства для регулирования стока

из них повторяли уже признанные изобретения, о чем сообщилось студентам. Они восприняли это с удовлетворением.

Основным принципом проектирования процедура поиска технических решений определена как установление бинарных отношений между множествами признаков и технических решений, причем возможные варианты составляют подмножество

$$X_0 = \underset{df}{(x \vee p) [(a, p) \in \Phi \wedge (p, x) \in \Psi \wedge p \in P_0 \wedge a \in A_0]}.$$

Объект проектирования в ходе выполнения процедуры должен получить вначале функциональное, а затем структурное описание.

Функциональная модель включает множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой и правило упорядочения смены состояний в ходе достижения цели. Множество признаков взаимодействия системы со средой эквивалентно множеству частных функций. Методы функционального описания находят отражение во многих литературных источниках. Ограничимся рассмотрением трех из них. В работе Ф. Ханзена [57] отмечается, что во всяком техническом устройстве имеется связь между причиной и действием, т. е. существует как минимум одна входная и одна выходная величина. Связь между ними зависит от ряда постоянных структурных и управляющих величин. На этой основе любое техническое решение может быть представлено схемой, приведенной на рис. 4.1.

На ней в виде прямоугольников обозначены функциональные элементы (множества: $W_{\text{вх}}$ — входных величин, $W_{\text{вых}}$ — выходных величин, $P_{(K)}$ — постоянных структурных величин, $Z(y)$ — управляющих величин).

Выделив частные функции, можно построить дифференцированную функциональную схему. В качестве примера на рис. 4.2 приводится кинематическая и функциональная схема устройства для регулирования стока. В качестве основных функциональных элементов на схеме отражены: e_1 — резервуар с датчиком, e_2 — преобразующее устройство, e_3 — устройство для стока, e_4 — управляющее устройство.

Входной величиной $W_{вх}$ является объем жидкости в резервуаре, выходной $W_{вых}$ — расход жидкости на стоке. Выходной величиной функционального элемента e_1 оказывается $w_{вых1}$ (перемещение левого плеча рычага функционального элемента); e_2 — $w_{вых2}$ (перемещение правого плеча). Постоянные структурные величины: p_1 — длина рычага; p_2 — жесткость пружин; p_3 — площадь рабочей поверхности датчика; p_4 — диаметр трубопровода для стока. Управляемой величиной устройства является $z_{(y)}$ — положение опоры рычага. Функциональная схема согласуется с кинематической, содержит столько же элементов, но открывает возможность создания иных устройств путем замены конструктивных исполнений функциональных элементов.

Еще один подход к функциональному описанию находим в работе [1]. В ней отмечается, что в литературе и на практике обычно используют две формы описания функции. Одна из них основывается на модели «черного ящика» и указывает лишь исходное или начальное состояние и конечный результат. Формула такого представления имеет следующий вид:

$$Y_{(s)} = (S^n \rightarrow S^k),$$

где $Y_{(s)}$ — функция рассматриваемой технической системы; S^n — начальное состояние системы; S^k — конечный результат; $\rightarrow$ — знак, означающий преобразование.

Вторая форма, называемая естественной, кроме уже названных компонент, включает условия и ограничения и имеет следующий вид:

$$Y_{(s)} = ((S^n \rightarrow S^k), H_{(o)}),$$

где $H_{(o)}$ — описание особых условий и ограничений.

Естественную форму представляют в виде трех компонент:

$$Y_{(s)} = (D_{(o)}, G_{(o)}, H_{(o)}),$$

где $D_{(o)}$ — указание действия, производимого технической системой, приводящего к желаемому результату; $G_{(o)}$ — указание объекта (объектов), на который направлено действие.

Например, функциональное описание ленточного транспортера в естественной форме выражается предложением: «Транспортировка между двумя точками в пространстве штучных или (и) сыпучих грузов при угле наклона между точками не более 20° ». В этом предложении можно выделить все три компоненты описания: $D_{(o)}$ — «транспортировка между двумя точками в пространстве»; $G_{(o)}$ — «штучных или (и) сыпучих грузов»; $H_{(o)}$ — «при угле наклона между точками не более 20° ».

Под приведенное функциональное описание могут подойти и другие технические системы, такие как, например: автотранспорт, пневмотранспорт, гужевой транспорт и др. Для конкретизации объекта необходимо увеличить число условий и ограничений. Так, для однозначного описания функции ленточного транспор-

тера $H_{(o)}$ следует пополнить указанием на то, что транспортировка грузов происходит непрерывно движущейся лентой.

Естественное описание функции технической системы с выделением трех основных компонент удобно и для автоматизированного поиска технических решений. В указанных действиях ($D_{(o)}$), объектах ($G_{(o)}$) и особых условиях ($H_{(o)}$) можно выделить ключевые слова, по которым произойдет обращение к банку данных, и информационно-поисковая система выдает по ним варианты технических решений. Так, в последнем примере в компоненте $D_{(o)}$ ключевым словом можно выделить «транспортирование», в $G_{(o)}$ — «грузов», в $H_{(o)}$ — «наклон не более 20° ». По таким ключевым словам информационно-поисковая система выдаст ряд технических решений. Если же включить дополнительное ключевое слово «лента», то область технических систем сузится до ленточных транспортеров, но и здесь могут быть несколько вариантов, отличающихся конструкцией ленты, привода, приводного и натяжного барабана, рамы и т. д.

Нужно отметить, что и действия ($D_{(o)}$) и объекты ($G_{(o)}$) в функциональном описании могут быть не единственными и к тому же объединенными логическими связями — конъюнкцией или дизъюнкцией.

Например, функциональное описание машины для нарезания щелей в мерзлом грунте может быть представлено:

$Y_{(s)}:: = \langle \text{разрушение} \rangle | \langle \text{разрушение} \rangle \langle \text{удаление} \rangle, \langle \text{мерзлый грунт} \rangle, \langle \text{узкая щель} \rangle.$

Обратимся к функционально-стоимостному анализу. В нем находим классификацию любой технической системы.

Выделим четыре уровня: I — общесистемные функции (главные и вспомогательные); II — вспомогательные основные функции; III, IV — внутренние главные и вспомогательные функции. Успешно функционирующая система отвечает принципам совместности, актуальности, сосредоточения и гибкости (управляемости) функций.

По этим принципам должны контролироваться разрабатываемые функциональные модели, которые рекомендуется строить в виде графа, ориентированного на указанные выше уровни.

Направление совершенствования функциональной модели связано с сокращением числа функций и увеличением их гибкости. Проверка функциональной модели на правильность группировки и распределения функций по видам может быть выполнена по методу, базирующемуся на применении детерминированной логики и использующему построение диаграммы функций, напоминающих сетевые графики.

По функциональному описанию строится структурное, включающее множество связей между элементами. Для всего этого требуется база данных, логическая организация которой была бы подобна Указателю механизмов в семитомном справочном пособии И. И. Артоболевского [7]. Указатель связывает функциональное

назначение механизмов с их структурно-конструктивными признаками.

Элементы и множество связей между ними и их признаками могут быть представлены в форме графа, носящего название И—ИЛИ дерева [1]. На нем в виде вершин изображаются структурные элементы, в качестве которых могут быть узлы, детали, части деталей. На этом же графе рядом со структурной вершиной изображаются вершины признаков. Вершины могут быть двух видов И или ИЛИ. На графе они имеют разное обозначение. Дуги графа означают связи между структурными элементами. И—ИЛИ дерево может относиться как к одной конкретной технической системе, так и к целой их совокупности. В последнем случае каждой технической системе соответствует конкретный путь от основания дерева к его вершине.

И—ИЛИ дерево — удобное средство представления всего множества технических решений и выбора по нему элементов, отвечающих требуемым признакам. Однако его построение связано с большой подготовительной работой.

Вновь обратимся к примеру проектирования устройства для разработки мерзлых грунтов. В предыдущей главе определены цели, проектирования и основные признаки объекта. Принимаем их как входную информацию для поиска возможных конструктивных решений. Вопросам разработки мерзлых грунтов посвящены многочисленные статьи в специальных журналах. Полезную информацию содержат учебники, справочники и монографии.

Авторские свидетельства, выданные на изобретения, связанные с разработкой мерзлых грунтов, объединены в класс E 02F5/30.

Среди многочисленных способов разработки мерзлых грунтов заметное место занимает крупный скол. Как уже отмечалось, мерзлый грунт при механическом разрушении в наименьшей степени сопротивляется деформациям растяжения. Скол наиболее близок к этому виду деформации. В настоящее время уже созданы некоторые виды машин для крупного скола. Не станем останавливаться на их анализе, отметим только, что возможности этого способа далеко не исчерпаны.

Крупный скол может производиться как без предварительной подготовки массива, так и с подготовкой нарезанием блоков. Второй метод оказывается более рациональным, так как, во-первых, облегчает скол, а, во-вторых, четко ограничивает зону разрушения.

Сузим задачу поиска возможных технических решений при разрушении мерзлых грунтов. Ограничимся лишь разработкой вариантов устройства для формирования блоков в массиве мерзлого грунта. Воспользуемся методом составления таблицы приемлемости.

Общая функция проектируемого устройства состоит в расчленении массива мерзлого грунта, подлежащего разработке, на отдельные блоки; частные функции: разрушение мерзлого грунта

по границам блока на глубину промерзания и перемещение устройства. Из анализа способов разрушения стало известно, что они могут быть механическими и термическими. Не исключается и совмещение обоих способов. Рабочими инструментами механического воздействия могут быть: нож, фреза дисковая, фреза кольцевая, бар, винт, клин ударный. Термическое воздействие может производиться: огнем, инфракрасными излучателями и СВЧ генераторами, электрическим пробоем токами промышленной частоты, ТВЧ, конденсаторами.

Перемещаться устройство может на гусеничном или колесном ходу, на салазках, переносом.

Каждый из вариантов (табл. 4.2) технических устройств представляет собой возможное сочетание способов выполнения частных

Таблица 4.2

Варианты технических устройств для разработки щелей
в мерзлом грунте

Разрушение мерзлого грунта									Перемещение устройства				Общая функция
механическое						термическое			колесное	гусеничное	салазки	перенос	
нож	дисковая фреза	кольцевая фреза	бар	винт	клин	огонь	излучатель	электрический пробой					
u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	u_{21}	u_{22}	u_{23}					
1										1			x_1
	1									1			x_2
		1							1				x_3
			1						1				x_4
				1						1			x_5
					1					1			x_6
						1						1	x_7
						1					1		x_8
								1				1	x_9
1							1			1			x_{10}
	1						1			1			x_{11}
							1					1	x_{12}

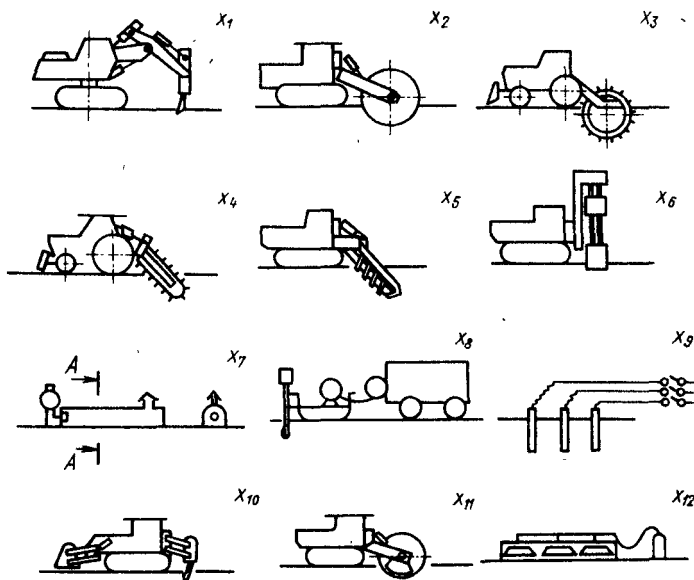


Рис. 4.3. Принципиальные схемы устройства для нарезания щелей в мерзлом грунте

функций. В таблице приведены далеко не все сочетания. Сделано это, чтобы не загромождать последующий анализ. Принципиальные схемы устройств (машины, оборудование) показаны на рис. 4.3. Дадим их краткое описание.

Вариант x_1 использует одноковшовый экскаватор. Ковш его заменен ножом, которым и нарезаются прорезы в массиве грунта. Подобное рабочее оборудование уже применяется.

Вариант x_2 имеет аналог в виде дискофрезерной машины ДФМ-50.

Вариант x_3 не имеет прямого аналога, однако известна кольцевая фреза для резания камня. В отличие от нее фреза по предлагаемому техническому решению имеет внутреннее зацепление, передающее вращение диску с резцами. Последний вращается на подшипнике вокруг оси, расположенной внутри неподвижных щек.

Вариант x_4 представлен схемой однобарабового механизма на базе экскаватора ЭТН-124.

Вариант x_5 предполагает разрушение грунта вращающимся шнеком, на винтовой поверхности которого расположены резцы.

Устройство по варианту x_6 разрушает мерзлый грунт клином, периодически перемещаясь вдоль разрабатываемой щели.

Вариант x_7 использует оттаивание грунта сжиганием жидкого топлива внутри тепляков.

По варианту x_8 шель разрабатывается термобуром РТБ-В2; в вертикальном направлении термобур перемещается по направляющим, в горизонтальном — на салазках. В схему кроме термобура входят бак с горючим и компрессор.

По варианту x_9 используются электроды, забиваемые в мерзлый грунт по контуру формируемых блоков. На электроды подается электроэнергия от высокочастотного генератора. Происходит диэлектрический пробой с образованием токопроводящего канала. В грунте возникают термические напряжения, приводящие его к местному разрушению.

Варианты x_{10} и x_{11} совмещают послойное термическое разрушение под воздействием сверхвысокочастотного магнитного поля с механическим.

По варианту x_{12} мерзлый грунт разрушается под воздействием инфракрасного излучения.

Приведенный пример еще раз убеждает в действенности морфологического анализа. Общее количество вариантов, как уже отмечалось, могло бы составить свыше 36. Для рассмотрения выбраны только 12 вариантов.

Метод легко формализуем. Сложность представляет лишь операция исключения вариантов, составленных из несовместимых средств реализации частных функций.

4.4. ПОИСК ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Процедура поиска технических решений заключается в составлении функционального и структурного описания объекта проектирования. Функциональное описание строится на основе концептуального, причем решающее значение имеет его головная часть. В зависимости от того, на что направлено проектирование — на улучшения существующей конструкции, создание новой или обеспечение определенного состояния того или иного процесса, выбирается метод выполнения всей процедуры. Для автоматизированного поиска средств улучшения конструкции наиболее целесообразен метод использования И—ИЛИ дерева. Подробное изложение методики построения И—ИЛИ дерева и его использования в поисковом конструировании содержится в [1].

Техническое решение, как описание структуры технической системы, включает информацию о функциональных элементах (комплекты, сборочные единицы, детали), их взаимном расположении и взаимосвязи, а также об особенностях конструктивного исполнения, геометрической формы, основных признаках и параметрах.

Функциональные элементы представляют собой конечное множество деталей, узлов, комплектов, предназначенное для выполнения определенной функции, входящей в функциональное описание. Функциональным элементом может быть и отдельная деталь, и машина в целом. Все зависит от функции. В описание

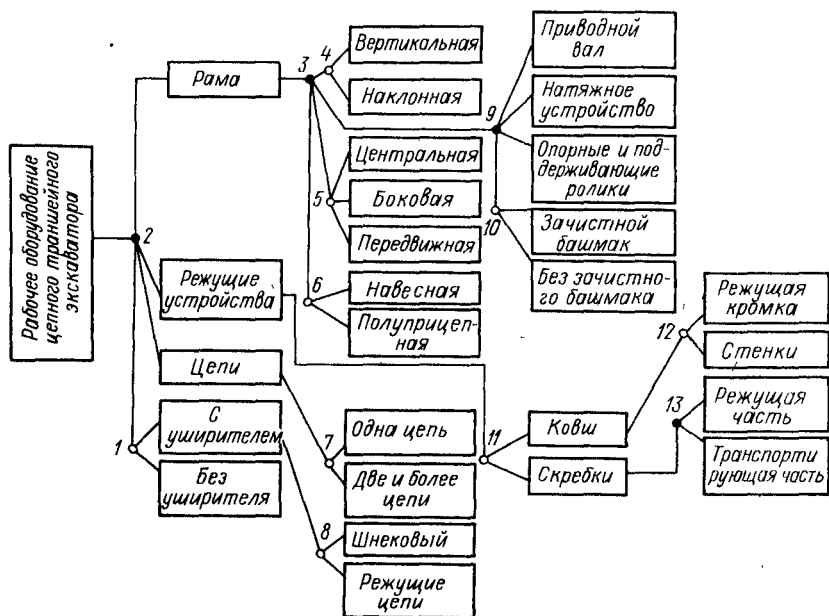


Рис. 4.4. И—ИЛИ дерево технических решений рабочего оборудования цепного траншейного экскаватора

функционального элемента должны входить функция и признаки. Например, такой функциональный элемент, как двигатель, должен быть представлен, во-первых, сообщением о том, для привода каких подсистем машины он предназначен, а, во-вторых, о его основных признаках (электродвигатель, ДВС, гидродвигатель и т. п.). Каждый функциональный элемент может быть рассмотрен как конечное множество функциональных элементов более низкого иерархического уровня. Функциональные элементы вступают во взаимосвязь, обеспечивая единство технической системы и поддерживая работу друг друга. Графическое отображение функциональных элементов в виде вершин и связей между ними в виде ребер составляют граф $G = T \{E, U\}$, где E — множество функциональных элементов (вершин); U — множество связей (ребер). Если связи указывают лишь соподчиненность функциональных элементов, находящихся на разных иерархических уровнях, и все функциональные элементы представляют собой непересекающиеся множества входящих в них комплектов, узлов или деталей, то граф приобретает форму дерева. Для примера на рис. 4.4 представлено дерево технического решения рабочего оборудования многоковшового траншейного экскаватора. При построении дерева технического решения выполняют следующие операции: 1) изучают готовую техническую систему и определяют ее общую функцию; 2) разбивают техническую систему на подсистемы так,

чтобы выполняемые ими функции полностью обеспечивали выполнение общей функции (выделенные подсистемы составляют функциональные элементы второго уровня, так как функциональным элементом первого уровня является вся система); 3) выделяют функциональные элементы третьего уровня по их частным функциям и т. д.

Количество иерархических уровней зависит от предметной области объекта проектирования. Наиболее часто используются: машина в целом, подсистема, узлы, входящие в подсистему; механизмы, детали, поверхности. Два или более технических решений, имеющих одинаковую функцию (одинаковое функциональное описание), могут быть представлены одним иерархическим деревом. Одинаковые функциональные элементы технических решений обозначаются вершинами типа И, элементы одинакового функционального назначения, но отличающиеся исполнением — вершинами типа ИЛИ.

Древовидный граф с вершинами И и ИЛИ называется И—ИЛИ деревом. И—ИЛИ дерево способно хранить в компактном виде информацию о множестве всех технических решений, относящихся как к машине в целом, так и к ее функциональным элементам.

Альтернативные функциональные элементы могут быть представлены на дереве своими конструктивными признаками. На рис. 4.4 вершины И помечены зачерненными кружочками, а вершины ИЛИ — светлыми. Альтернативные функциональные элементы объединены вершинами ИЛИ. Так, рама рабочего оборудования может быть навесной или полуприцепной. Это обстоятельство на схеме обозначено вершиной ИЛИ под номером 6. При объединении технических решений в одно общее дерево следует следить за совместимостью функциональных элементов и их признаков. Под совместимостью [19] понимается такая общность элементов и их признаков, которая обеспечивает возможность их взаимодействия. Дерево технических решений имеет одну корневую вершину, расположенную на самом высоком иерархическом уровне. Эта вершина обозначает всю общность заключенных в дереве технических решений: группу, вид, класс, род. Для построения общего дерева используется три метода [19]: 1) вначале по одному техническому решению строится дерево, а затем оно достраивается по другим техническим решениям; 2) строятся деревья по всем техническим решениям, а затем они объединяются; 3) множество технических решений разбивается на подмножества, внутри каждого из них строится дерево, а затем они объединяются.

Построение общего дерева технических решений — несомненно трудоемкий процесс. Поэтому можно ограничить исходное множество только наиболее перспективными и оригинальными техническими решениями, обладающими к тому же наиболее высокими технико-экономическими показателями. В дальнейшем рас-

ширение множества может осуществляться не только по техническим решениям, относящимся к машине в целом, но и по отдельным ее функциональным элементам, с использованием информации из различных источников, включая авторские свидетельства и патенты. Расширение множества технических решений позволит отыскивать на нем не только уже созданные объекты, но и новые. Однако само дерево несет информацию лишь о структуре технических решений и о их конструктивных признаках. Этого недостаточно для выбора вариантов, отвечающих другим элементам множества признаков из концептуального описания. Поэтому дерево нужно дополнить средством формального отражения отношений на множествах технических решений, их функций и признаков.

Воспользуемся для этого матрицей соответствий. Строки матрицы соответствуют функциональным элементам, а столбцы — признакам из полного их множества. Матрица определена на множестве значений: $+1, 0, -1$ ($+1$ — означает, что техническое решение функционального элемента улучшает соответствующий признак; 0 — техническое решение не характеризуется данным признаком; -1 — техническое решение ухудшает соответствующий признак).

Дерево технических решений, матрица соответствий, концептуальное и функциональное описания объекта проектирования представляют необходимые данные для выработки вариантов объекта проектирования.

Для формализации алгоритма выбора вариантов вводятся [19] обозначения. Прежде всего, на графе $G = T \{E, U\} : E = \{e\}$ — множество вершин; e_0 — корневая вершина; E_1 — множество вершин И; E_2 — множество вершин ИЛИ; U — множество ребер.

Будем рассматривать древовидные графы с одной корневой вершиной e_0 , составленные на определенный вид объектов проектирования. Подобные графы носят название прадерева с корнем e_0 . Используем следующие обозначения и выражения: $F(e)$ — множество вершин прадерева, связанных ребрами с вершиной $e \in E$,

$$F(e) = \{s \in E \mid \exists u (e, s) \in U\};$$

K — множество висячих вершин прадерева

$$K = \{s \in E \mid F(s) = \emptyset\},$$

R_T — множество комбинаций вершин на прадереве; D — комбинация вершин прадерева.

Используя эти обозначения и выражения, можем записать, что $D \in R_T$ тогда, и только тогда, когда [19]

$$\left. \begin{aligned} e_0 &\in D; \\ e \in D \cap E_1 \setminus K &\Rightarrow F(e) \subset D; \\ e \in D \cap E_2 \setminus K &\Rightarrow \exists s \in F(e) \cap D; \\ (F(e) \setminus s) \cap D &= \emptyset. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Каждая комбинация вершин представляет структуру определенного варианта, который может быть или уже известным, или новым, определенным на множестве вершин прадерева. Общее количество вариантов объекта, заключенное в прадевре, равно мощности множества комбинаций. Для его подсчета воспользуемся алгоритмом.

1. Пометить все висячие вершины; дугам, заходящим в них, присвоить вес, равный 1.
2. Найти непомеченную вершину $e \in E$ такую, что все исходящие из нее дуги имеют некоторые веса.
3. Если $e = e_0$, то перейти к 7.
4. Пометить вершину e ; если $e \in E_2$, то перейти к 6.
5. Приписать заходящей в e дуге вес, равный произведению весов всех дуг, исходящих из e ; перейти к 2.
6. Приписать заходящей в e дуге вес, равный сумме весов всех дуг, исходящих из e ; перейти к 2.
7. Если $e_0 \in E_1$, то мощность множества комбинаций равна произведению весов всех дуг, исходящих из e_0 ; в противном случае $|R_T|$ равно сумме весов этих дуг.
8. Конец.

Для пояснения принципа действия алгоритма разберем его на простом примере. Определим мощность множества комбинаций вершин дерева на рис. 4.5, а. На нем 12 вершин; из них одна корневая (1), три вершины И (1, 2, 3) помечены знаком конъюнкции, две вершины ИЛИ (4, 5) — знаком дизъюнкции, семь висячих вершин (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) — точкой.

Подсчитаем вначале количество возможных комбинаций, не прибегая к алгоритму. Согласно (4.2) в комбинацию должны войти: корневая вершина (1), вершины с предшественником в виде вершин И (2, 3, 4, 5, 6, 7), по одной из вершин последователей, предшественником которых является вошедшая в комбинацию вершина ИЛИ (8 или 9, 10 или 11, или 12).

Запишем все возможные комбинации в виде множества входящих в них вершин:

$$\begin{aligned} D_1 &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10\}, \\ D_2 &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11\}, \\ D_3 &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12\}, \\ D_4 &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10\}, \\ D_5 &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11\}, \\ D_6 &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12\}. \end{aligned}$$

Итого составлено 6 комбинаций. Теперь воспользуемся алгоритмом. После выполнения первичной команды на дереве помечены знаком $+$ — все висячие вершины; дугам, заходящим в них, присвоен вес, равный 1 (рис. 4.5, б). Переход к команде 2. Найдена непомеченная вершина (4). Все исходящие из нее дуги имеют веса. Переход к команде 3. Вершина 4 ($e \neq e_0$) не корневая. Переход к четвертой команде. Вершина 4 помечена (рис. 4.5, в), и так

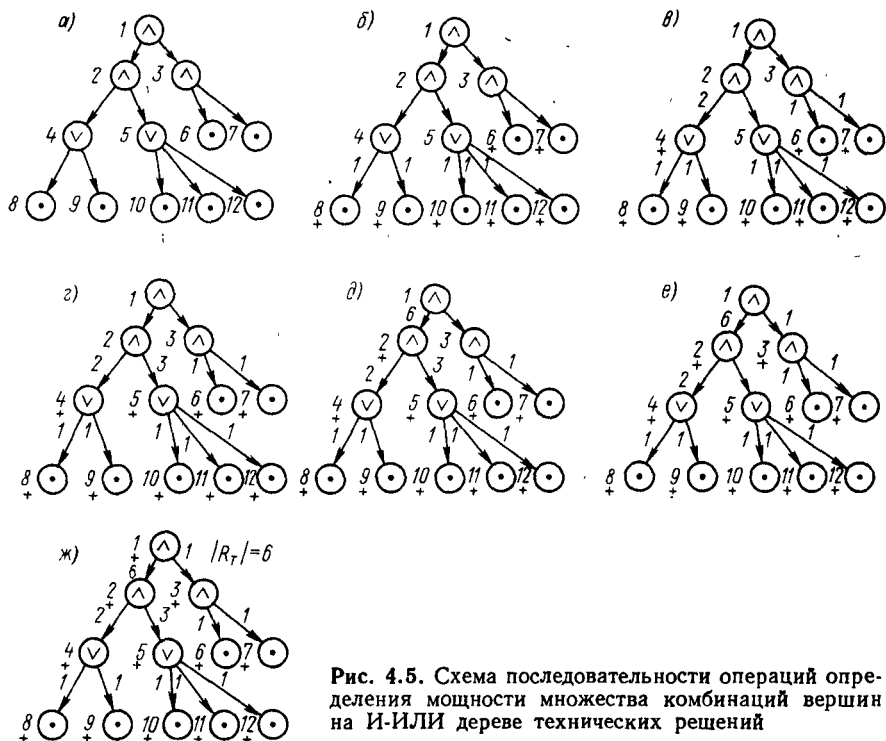


Рис. 4.5. Схема последовательности операций определения мощности множества комбинаций вершин на И-ИЛИ дереве технических решений

как она принадлежит к вершинам ИЛИ ($e \in E_2$), то переход к команде 6. Дуге, заходящей в 4, приписан вес, равный сумме весов исходящих дуг (2). Переход к команде 2.

Найдена непомеченная вершина 5, все исходящие из нее дуги имеют вес. Переход к команде 3. Вершина 5 не корневая ($e \neq e_0$). Переход к команде 4. Вершина 5 помечена (рис. 4.5, г), и так как она принадлежит к вершинам ИЛИ ($e \in E_2$), то переход к команде 6. Дуге, заходящей в 5, присвоен вес, равный сумме весов исходящих дуг (3). Переход к команде 2.

Найдена непомеченная вершина 2, все исходящие из нее дуги имеют вес. Переход к команде 3. Вершина 2 не корневая ($e \neq e_0$). Переход к команде 4. Вершина 2 помечена (рис. 4.5, д), и так как она не принадлежит вершинам ИЛИ ($e \notin E_2$), то переход к команде 5. Дуге, заходящей в вершину 2, приписан вес, равный произведению весов всех исходящих из нее дуг ($2 \times 3 = 6$). Переход к команде 2.

Найдена непомеченная вершина 3, все исходящие из нее дуги имеют вес. Переход к команде 3. Вершина 3 не корневая ($e \neq e_0$). Переход к команде 4. Вершина 3 помечена (рис. 4.5, е), и так как она не принадлежит к вершинам ИЛИ, то переход к команде 5.

Дуге, заходящей в 3, приписан вес, равный произведению весов исходящих дуг (1). Переход к команде 2.

Найдена последняя непомеченная вершина 1, все исходящие из нее дуги имеют вес. Переход к команде 3. Вершина 1 корневая ($e = e_0$), переход к команде 7. Вершина 1 принадлежит к вершинам И ($e = E_1$), мощность множества комбинаций вершин равна произведению весов всех исходящих из 1 дуг, т. е. $|R_T| = 6$. Переход к команде 8.

Конец.

Перейдем к рассмотрению алгоритма выбора рациональных комбинаций вершин на основе бинарных отношений между множеством признаков и множеством технических решений, отображенным на графе. В результате выполнения алгоритма должно быть получено структурное описание множества рациональных вариантов объекта проектирования.

1. Включить в описание корневую вершину (e_0), т. е. название всего вида объектов проектирования.
2. Присвоить индексу переменной e значение $i = 1$.
3. Рассмотреть вершину e_i ; если ее предшественник принадлежит к вершинам И, то включить e_i в описание и перейти к 5; если же предшественник e_i принадлежит E_2 , то обратиться к матрице соответствий.
4. В матрице соответствий найти функциональный элемент, предшественник вершины e_i . Рассмотреть все технические решения по вершинам последователям и отобрать из них то, которое в большей степени отвечает признакам в концептуальном описании. Для этого признаки концептуального описания сопоставляются со строками признаков технического решения по матрице соответствий. Возможны следующие случаи: 1) среди технических решений окажется одно, отвечающее всем признакам концептуального описания (оно включается в структурное описание; перейти к 5); 2) из технических решений два и более отвечают всем признакам концептуального описания (выбрать случайным образом одно из них; перейти к 5); 3) ни одно из технических решений не удовлетворяет ни одному из признаков концептуального описания (выбрать случайным образом одно из них; перейти к 5); 4) технические решения в разной степени удовлетворяют или не удовлетворяют признакам концептуального описания (выбрать то из них, которое отвечает большему числу признаков, при его равенстве отдать предпочтение тому из технических решений, признаки которого соответствуют более важным целям проектирования; в концептуальном описании эти цели занимают первые места; выбрав одно техническое решение, остальные исключают из рассмотрения в первом и четвертом случае во всех последующих циклах, во втором и третьем — в ходе выполнения текущего цикла); 5) техническое решение e_i является единственным последователем своего предшественника. Вершина включается в описание.

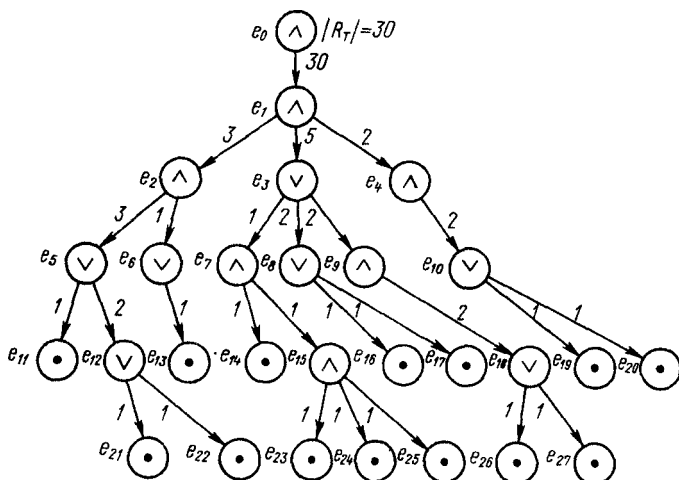


Рис. 4.6. Прадерево технических решений

5. Дать приращение индексу переменной e , $i = i + 1$.
6. Если $i \leq n$, где n — наибольшее значение индекса на прадереве, то перейти к 8.
7. Вывести на печать или другое устройство описание варианта и проверить условие: число описаний достигло множества комбинаций $|R_T|$ или исчерпано время, отведенное на выполнение процедуры. При выполнении условия, идти к 10, в противном случае — к 1.
8. Если e_i уже включена в описание или исключена из рассмотрения, или ее предшественник не вошел в описание на предыдущем шаге, то e_i исключается из описания; перейти к 5. Для выполнения команды необходимо, чтобы номер вершины последователя был всегда больше номера предшественника.
9. Перейти к 3.
10. Конец.

Рассмотрим работу алгоритма выбора вариантов объекта проектирования. Дано:

- 1) концептуальное описание

$$\widehat{O\Pi}_2 = \{a_0[a_1(p_1, p_2); a_2(p_3, p_5)]\},$$

где a_0 — выражение потребности проектирования объекта с указанием признаков назначения; a_1, a_2 — цели проектирования в ранжированной последовательности; p_1, p_2, p_3, p_5 — признаки, соответствующие целям проектирования из полного множества признаков;

- 2) дерево технических решений (рис. 4.6);
- 3) матрица соответствий (табл. 4.3).

Матрица соответствий

Функциональный элемент e_i	Признак P_i							Функциональный элемент e_i	Признак P_i						
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7		p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
e_1	-1	1		-1		1		e_{15}	1			-1			1
e_2		1		1		-1	1	e_{16}			1		1		
e_3	1		1	-1			-1	e_{17}		1		-1		1	
e_4				1				e_{18}				1			-1
e_5			-1					e_{19}	1	1	1		1		
e_6	1			1				e_{20}	1	1	1		1		
e_7			-1			-1		e_{21}							
e_8		1			1		-1	e_{22}				-1		-1	
e_9				1				e_{23}	-1		1			1	
e_{10}					-1			e_{24}			1			1	
e_{11}		-1		-1				e_{25}				-1			1
e_{12}		-1			-1		1	e_{26}	1		1				
e_{13}		1		1		1		e_{27}	1		-1			-1	
e_{14}			-1			1									

Функциональное описание объекта проектирования при выборе вариантов по прадереву не обязательно, так как оно заложено в само прадереву.

Прежде всего подсчитаем мощность множества комбинаций. Это выполнено по ранее приведенному алгоритму и представлено на графе рис. 4.6 ($|R_T| = 30$). Теперь приступим к алгоритму выбора рациональных комбинаций.

1. Включаем в структурное описание название корневой вершины e_0 ; переход к команде 2.
2. $i = 1$, переход к команде 3.
3. Рассматриваем вершину e_1 . Ее предшественник принадлежит к вершинам И. Включаем в описание e_1 ; переход к команде 5.
4. $i = i + 1 = 1 + 1 = 2$; переход к команде 6.
5. $i = 2 < N = 27$; переход к команде 8.

6. Вершина e_2 не исключена из рассмотрения, предшественник вершины e_2 вошел в описание ($e_1 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 3.
7. Предшественник вершины e_2 принадлежит к вершинам И, e_2 включается в описание ($e_2 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 5.
8. $i = i + 1 = 2 + 1 = 3$; переход к команде 6.
9. $i = 3 < N$; переход к команде 8.
10. Вершина e_3 не исключена из рассмотрения, предшественник вершины e_3 вошел в описание ($e_1 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 3.
11. Предшественник вершины e_3 принадлежит к вершине И ($e_1 \in E_1$). Вершину e_3 включили в описание ($e_3 \in \overline{OP_4}$), переход к команде 5.
12. $i = i + 1 = 3 + 1 = 4$; переход к команде 6.
13. $i = 4 < N$; переход к команде 8.
14. Вершина e_4 не исключена из рассмотрения; предшественник вершины e_4 вошел в описание ($e_1 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 3.
15. Предшественник вершины e_4 принадлежит к вершинам И ($e_1 \in E_1$). Вершина e_4 включается в описание ($e_4 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 5.
16. $i = i + 1 = 4 + 1 = 5$; переход к команде 6.
17. $i = 5 < N$; переход к команде 8.
18. Вершина e_5 не исключена из рассмотрения, предшественник e_5 вошел в описание ($e_2 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 3.
19. Предшественник e_5 принадлежит к вершинам И ($e_2 \in E_1$), e_5 включается в описание ($e_5 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 5.
20. $i = i + 1 = 5 + 1 = 6$; переход к команде 6.
21. $i = 6 < N$; переход к команде 8.
22. Вершина e_6 не исключена из рассмотрения, предшественник e_6 включен в описание ($e_2 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 3.
23. Предшественник e_6 принадлежит к вершинам И, e_6 включается в описание ($e_6 \in \overline{OP_4}$); переход к команде 5.
24. $i = i + 1 = 6 + 1 = 7$; переход к команде 6.
25. $i = 7 < N$; переход к команде 8.
26. Вершина e_7 не исключена из рассмотрения, предшественник e_7 принадлежит к вершинам ИЛИ ($e_3 \in E_2$); переход к команде 4.
27. Отыскиваем предшественника e_7 , им является вершина e_3 . Последователями вершины e_3 являются, кроме e_7 , вершины e_8 и e_9 . Проверяем, в какой мере технические решения, соответствующие вершинам e_7 , e_8 , e_9 , отвечают признакам концептуального описания.

Техническое решение e_7 не влияет на признаки p_1 , p_2 , p_5 ; ухудшает признак p_3 . Техническое решение e_8 не влияет на признаки p_1 , p_3 и улучшает признаки p_2 и p_5 ; техническое решение e_9 не влияет на все признаки концептуального описания. Сложившиеся ситуации соответствуют четвертому случаю. Среди технических

решений e_7 , e_8 , e_9 нужно отобрать такое, которое отвечало бы улучшению большего числа признаков концептуального описания. Таким оказывается техническое решение e_8 . Включаем его в описание ($e_8 \in \overline{OP}_4$); вершины e_7 , e_9 исключаются из рассмотрения в действующем и всех последующих циклах; переход к команде 5.

28. $i = i + 1 = 7 + 1 = 8$; переход к команде 6.

29. $i = 8 < N$; переход к команде 8.

30. Вершина e_8 уже вошла в описание; переход к команде 5.

31. $i = i + 1 = 8 + 1 = 9$; переход к команде 6.

32. $i = 9 < N$; переход к команде 8.

33. Вершина e_9 исключена из описания; переход к команде 5.

34. $i = i + 1 = 9 + 1 = 10$; переход к команде 6.

35. $i = 10 < N$; переход к команде 8.

36. Вершина e_{10} еще не вошла в описание, не исключена из описания, ее предшественник вошел в описание ($e_4 \in \overline{OP}_4$); переход к команде 3.

37. Предшественник вершины e_{10} принадлежит к вершинам И ($e_4 \in E_1$), e_{10} включается в описание ($e_{10} \in \overline{OP}_4$); переход к команде 5.

38. $i = i + 1 = 10 + 1 = 11$; переход к команде 6.

39. $i = 11 < N$; переход к команде 8.

40. Вершина e_{11} еще не включена в описание, не исключалась из описания, ее предшественник вошел в описание ($e_5 \in \overline{OP}_4$); переход к команде 3.

41. Предшественник вершины e_{11} принадлежит к вершинам ИЛИ ($e_5 \in E_2$); переход к команде 4.

42. В матрице соответствий находим предшественника вершины e_{11} и всех его последователей (e_{11} , e_{12}). Проверяем, в какой мере технические решения, соответствующие вершинам e_{11} , e_{12} , отвечают признакам концептуального описания. Техническое решение e_{11} не влияет на признаки p_1 , p_3 , p_5 и ухудшает признак p_2 ; техническое решение e_{12} не влияет на признаки p_1 , p_3 , ухудшает признаки p_2 и p_5 . Сложившаяся ситуация отвечает четвертому случаю. Из технических решений e_{11} и e_{12} следует отобрать e_{11} по принципу «из двух зол — меньшее». Вершина e_{12} исключается из описания в действующем и во всех последующих циклах; переход к команде 5.

43. $i = i + 1 = 11 + 1 = 12$; переход к команде 6.

44. $i = 12 < N$; переход к команде 8.

45. Вершина e_{12} исключена из описания; переход к команде 5.

46. $i = i + 1 = 12 + 1 = 13$; переход к команде 6.

47. $i = 13 < N$; переход к команде 8.

48. Вершина e_{13} еще не включена в описание, не исключалась из описания, предшественник вершины e_{13} включен в описание ($e_6 \in \overline{OP}_4$); переход к команде 3.

49. Предшественник вершины e_{13} относится к вершинам ИЛИ ($e_8 \in E_2$); переход к команде 4.
50. В матрице соответствий находим предшественника вершины e_{13} ; им оказывается вершина e_8 . Других последователей, кроме e_{13} , у вершины e_8 нет (случай 5). Независимо от того, в какой мере e_{13} отвечает признакам концептуального описания, ее необходимо включить в описание ($e_{13} \in \widetilde{ОП}_4$); переход к команде 5.
51. $i = i + 1 = 13 + 1 = 14$; переход к команде 6.
52. $i = 14 < N$; переход к команде 8.
53. Вершина e_{14} еще не включена в описание, не исключалась из описания, но ее предшественник исключен из описания; переход к команде 5.
54. $i = i + 1 = 14 + 1 = 15$; переход к команде 6.
55. $i = 15 < N$; переход к команде 8.
56. Предшественник вершины e_{15} не внесен в описание; переход к команде 5.
57. $i = i + 1 = 15 + 1 = 16$; переход к команде 6.
58. $i = 16 < N$; переход к команде 8.
59. Вершина e_{16} еще не включалась в описание, не исключалась из описания, ее предшественник включен в описание ($e_8 \in \widetilde{ОП}_4$); переход к команде 3.
60. Предшественник вершины e_{16} принадлежит к вершинам ИЛИ ($e_8 \in E_2$); переход к команде 4.
61. В матрице соответствий находим предшественника вершины e_{16} и всех последователей (e_{16}, e_{17}). Техническое решение e_{16} не влияет на признаки p_1, p_2 и улучшает признаки p_3 и p_5 ; техническое решение e_{17} не влияет на признаки p_1, p_3, p_5 и улучшает признак p_2 . Сложившаяся ситуация отвечает случаю 4. Техническое решение e_{16} улучшает большее число признаков концептуального описания (два из четырех), однако e_{17} улучшает признак, относящийся к первой цели проектирования. Следуя предписанию алгоритма, выбираем для включения в описание вершину e_{16} ($e_{16} \in \widetilde{ОП}_4$), исключая из дальнейшего рассмотрения e_{16} (в подобной ситуации следует предусмотреть обращение к конструктору для окончательного решения о приоритете и исключении из последующих циклов альтернативного технического решения); переход к команде 5.
62. $i = i + 1 = 16 + 1 = 17$; переход к команде 6.
63. $i = 17 < N$; переход к команде 8.
64. Вершина e_{17} исключена из описания; переход к команде 5.
65. $i = i + 1 = 17 + 1 = 18$ переход к команде 6.
66. $i = 18 < N$; переход к команде 8.
67. Предшественник вершины e_{18} исключен из описания ($e_9 \notin \widetilde{ОП}_4$); переход к команде 5.
68. $i = i + 1 = 18 + 1 = 19$; переход к команде 6.
69. $i = 19 < N$; переход к команде 8.

70. Вершина e_{19} еще не включалась в описание и не исключалась из него. Предшественник вершины e_{19} включен в описание ($e_{10} \in \overline{OP}_4$); переход к команде 3.
71. Предшественник вершины e_{19} принадлежит к вершинам ИЛИ; переход к команде 4.
72. Находим предшественника вершины e_{19} и всех его последователей (e_{19}, e_{20}). Технические решения e_{19} и e_{20} улучшают все признаки концептуального описания. Ситуация соответствует случаю 2. Следует случайным образом выбрать то или иное техническое решение. Пусть им окажется e_{20} . Вершина e_{20} включается в описание ($e_{20} \in \overline{OP}_4$), вершина e_{19} исключается из рассмотрения только внутри цикла отыскания рациональных комбинаций; переход к команде 5.
73. $i = i + 1 = 19 + 1 = 20$; переход к команде 6.
74. $i = 20 < N$; переход к команде 8.
75. Вершина e_{20} уже включена в описание; переход к команде 5.
76. $i = i + 1 = 20 + 1 = 21$; переход к команде 6.
77. $i = 21 < N$; переход к команде 8.
78. Предшественник вершины e_{21} исключен из описания ($e_{12} \notin \overline{OP}_4$); переход к команде 5.
79. $i = i + 1 = 21 + 1 = 22$; переход к команде 6.
80. $i = 22 < N$; переход к команде 8.
81. Предшественник вершины e_{22} исключен из описания ($e_{12} \notin \overline{OP}_4$); переход к команде 5.
82. $i = i + 1 = 22 + 1 = 23$; переход к команде 6.
83. $i = 23 < N$; переход к команде 8.
84. Предшественник вершины e_{23} не вошел в описание ($e_{15} \notin \overline{OP}_4$); переход к команде 5.
85. $i = i + 1 = 24$; переход к команде 6.
86. $i = 24 < N$; переход к команде 8.
87. Предшественник вершины e_{24} не вошел в описание ($e_{15} \notin \overline{OP}_4$); переход к команде 5.
88. $i = i + 1 = 24 + 1 = 25$; переход к команде 5.
89. $i = 25 < N$; переход к команде 8.
90. Предшественник вершины e_{25} не вошел в описание ($e_{15} \notin \overline{OP}_4$); переход к команде 5.
91. $i = i + 1 = 25 + 1 = 26$; переход к команде 6.
92. $i = 26 < N$; переход к команде 8.
93. Предшественник вершины e_{26} не вошел в описание ($e_{18} \notin \overline{OP}_4$); переход к команде 5.
94. $i = i + 1 = 26 + 1 = 27$; переход к команде 6.
95. $i = 27 < N$; переход к команде 8.
96. Предшественник вершины e_{27} не вошел в описание ($e_{18} \notin \overline{OP}_4$); переход к команде 5.

97. $i = i + 1 = 27 + 1 = 28$.

98. $i = 28 > N$; переход к команде 7.

99. Выводится на печать или другое устройство структурное описание варианта объекта проектирования в форме, соответствующей (2.10). При этом множество элементов и множество связей между ними может быть отображено в виде поддерева или матрицы инцидентий, а множество признаков составляется на основе следующего принципа:

$$p_i \in P \leftrightarrow [p_i]_{e_j} \neq -1, \quad (4.3)$$

где p_i — признак, включаемый в описание $\widetilde{OP}_4$; P — множество признаков к описанию; $[p_i]_{e_j}$ — значение признака p_i по функциональному элементу e_j . Завершим рассмотрение алгоритма выбора рациональных комбинаций вершин на прадереве, полагая, что истекло установленное время; переход к команде 100.

100. Конец.

В результате выполнения алгоритма мы получили одну комбинацию вершин, соответствующую одному варианту объекта проектирования. Повторное выполнение алгоритма в рассматриваемом примере могло бы привести к появлению еще трех комбинаций. Вторая комбинация возникает, если случайный выбор на шаге 72 выпадает на вершину e_{19} . Третья возможная комбинация появится, если на шаге 61 конструктором будет принято решение о включении в описание вершины e_{17} вместо e_{18} и случайный выбор падет на вершину e_{20} . Четвертая комбинация может возникнуть при выборе вершин e_{17} и e_{19} .

В примере из 30 возможных комбинаций таким образом отбираются четыре, в наибольшей степени отвечающие признакам концептуального описания. Проверим, какие же признаки войдут в структурное описание. Согласно (4.3) в список нужно включить только те из признаков концептуального описания, которые не содержат значений, равных -1 для всех функциональных элементов в структурном описании. В табл. 4.4 представлены функциональные элементы и множество значений их признаков для первой комбинации вершин. Из таблицы видно, что нет ни одного признака из концептуального описания, которые удовлетворяли бы условию (4.3). Для остальных комбинаций дело обстоит таким же образом. Однако полученные комбинации наиболее близки к оптимальному техническому решению объекта проектирования из всех возможных комбинаций на прадереве технических решений. Под оптимальным понимается техническое решение, удовлетворяющее всем признакам концептуального описания. Конструктор может принять решение о прекращении поиска вариантов и на следующем этапе выбрать из уже полученных наилучший или продолжить поиск, расширяя множество функциональных элементов на прадереве за счет включения в него вершин типа ИЛИ из числа технических решений, в большей степени отвечающих признакам концептуального описания.

Таблица 4.4

**Функциональные элементы технической системы
и множество их признаков**

Функцио- нальный элемент e_i	Признак p_i							Функцио- нальный элемент e_i	Признак p_i						
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7		p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
e_1	-1	1		-1		1		e_8		1			1		-1
e_2		1		1		-1	1	e_{10}					-1		
e_3	1		1	-1			-1	e_{11}		-1		-1			
e_4				1				e_{13}		1		1		1	
e_5			-1					e_{16}			1		1		
e_6	1			1				e_{20}	1	1	1		1		

Так, для улучшения полученного в примере варианта (по первой комбинации вершин прадерева) необходимо отыскать техническое решение функционального элемента e_1 , улучшающее показатели по признакам p_1 и p_4 ; функционального элемента e_2 — по признаку p_6 ; функционального элемента e_3 — по признаку p_4 ; функционального элемента e_5 — по признаку p_3 ; функционального элемента e_8 — по признаку p_7 ; функционального элемента e_{10} — по признаку p_5 ; функционального элемента e_{11} — по признакам p_2 и p_4 .

Дерево технических решений, как информационный массив M , удобно представить в виде матрицы смежностей.

Применительно к рассматриваемому примеру матрица смежностей для прадерева (рис. 4.6) представлена на стр. 146—147.

Строго треугольная матрица размера $n \times n$, где n — число вершин прадерева, определена на множестве булевых величин:

$$c_{ij}(n) = \begin{cases} 1 & \text{— пара вершин соединена дугой;} \\ 0 & \text{— пара вершин } i \text{ и } j \text{ не соединена дугой.} \end{cases}$$

Вектор-столбец за пределами матрицы определен на множестве $\{0, 1, 2\}$; 0 — вершина висющая; 1 — вершина принадлежит вершинам I ($e_i \in E_1$); 2 — вершина принадлежит вершинам II ($e_i \in E_2$).

Схема алгоритма выбора рациональных комбинаций представлена на рис. 4.7. На ней использованы идентификаторы из табл. 4.5.

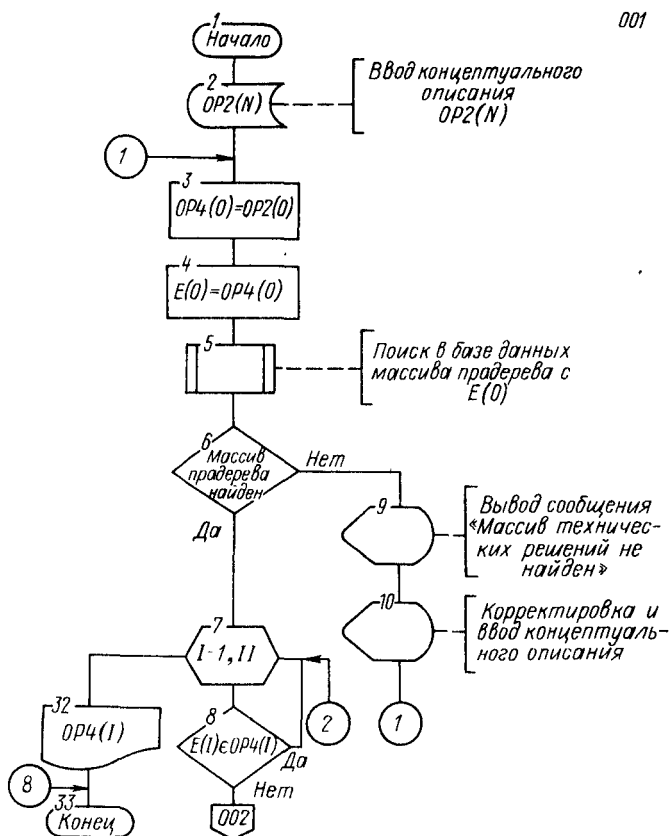
Под символом 2 подразумевается ввод концептуального описания, хранимого после выполнения процедуры его составления

e_0	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}	e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{14}	e_{15}	e_{16}	e_{17}	e_{18}	e_{19}	e_{20}	e_{21}	e_{22}	e_{23}	e_{24}	e_{25}	e_{26}	e_{27}		
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_0	1
	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_1	1
		0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_2	1
			0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_3	2
				0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_4	1
					0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_5	2
						0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_6	2
							0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_7	1
								0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_8	2
									0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_9	1
										0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	e_{10}	2
											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_{11}	0
												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	e_{12}	2
													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	e_{13}	0

в запоминающем устройстве, управляемом процессором. Символ 3 означает присвоение элементу структурного описания с индексом 0 значения, отражающего назначение объекта проектирования по его концептуальному описанию. Символы 4 и 5 связаны с поиском в базе данных массива в виде матрицы смежностей, отображающего прадерево технических решений с корневой вершиной $E(0)$. Символы 9 и 10 предусмотрены для сообщения в случае неудачного поиска. Если массив найден, то начинается цикл (символ 7) просмотра всех его элементов для составления структурного описания технических решений, отвечающих признакам, заложенным в концептуальном описании.

К моменту рассмотрения $E(I)$ эта вершина уже могла быть включена в структурное описание. Проверка этого обстоятельства предусмотрена символом 8. И если вершина $E(I)$ уже включена в структурное описание, то возвращаемся в начало цикла.

Если же условие, предусмотренное символом 8, не выполняется, то отыскивается предшественник вершины $E(I)$ и выясняется



002



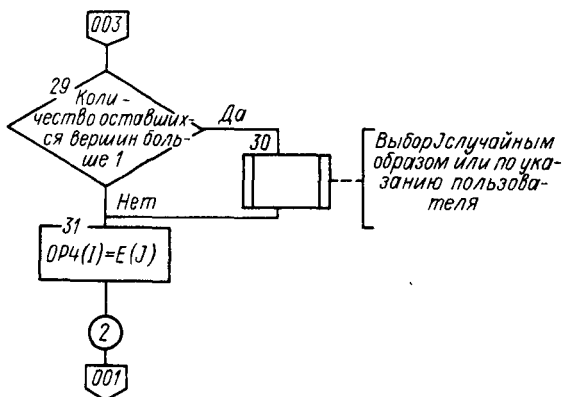
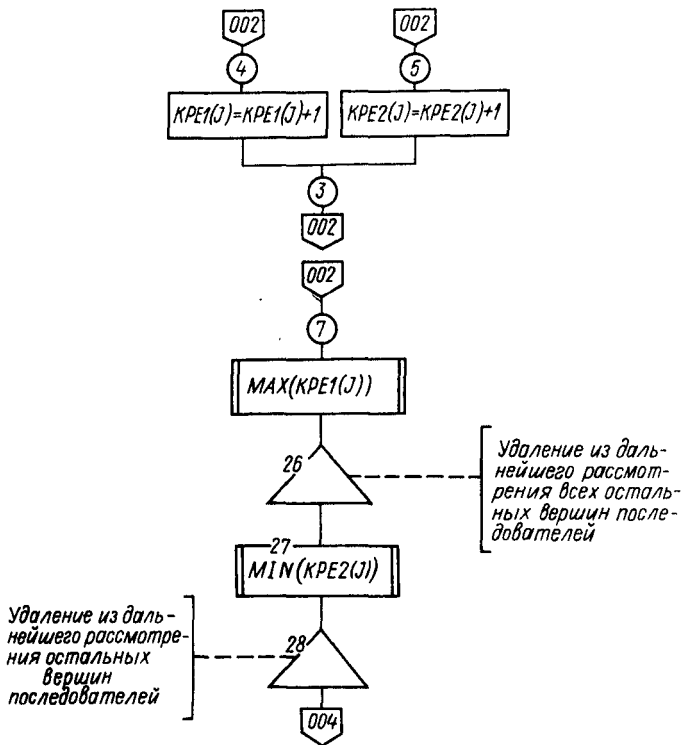


Рис. 4.7. Схема алгоритма выбора рациональных комбинаций вершин при поиске технических решений на И—ИЛИ дереве

Идентификаторы на схеме алгоритма рис. 4.7

Наименование данных в процедуре	Обозначение в алгоритме
Входные данные	
Массив прадерева технических решений по матрице смежностей	$EE(K, J)$
Массив по матрице соответствий	$EP(I, M)$
Массив элементов концептуального описания	$OP2(N)$
Число вершин прадерева	II
Массив вершин прадерева	$E(I)$
Число признаков в матрице соответствий	MM
Счетчик признаков по матрице соответствий со значением +1	$KPE1(J)$
Счетчик признаков по матрице соответствий со значением -1	$KPE2(J)$
Выходные данные	
Массив структурного описания объекта проектирования	$OP4(I)$

знаков из концептуального описания, которым он отвечает и не отвечает ($KPE1(J)$, $KPE2(J)$). Эта часть алгоритма соответствует символам 20—24.

После завершения цикла, обозначенного символом 18, из числа последователей выбираются имеющие наибольшие значения $KPE1(J)$ (символ 25), а все остальные удаляются из дальнейшего рассмотрения (символ 26). Из оставшихся выбирают имеющие меньшее значение $KPE2(J)$ (символ 27). Если количество оставшихся последователей больше 1, то для структурного описания выбирается один из них: случайным образом или по указанию пользователя (символ 30).

Представляется возможным для поиска технических решений использовать развивающееся в настоящее время семантическое моделирование [3]. Под ним понимается исследование свойств объекта на основе представления знаний о нем с применением логических и лингвистических переменных и средств логического вывода. Методы семантического моделирования используют специальный концептуальный язык, формализующий аксиоматическое описание области поиска и обеспечивающий получение информации о техническом решении, принадлежащем этой области, логическими выводами.

Концептуальный язык должен отражать связи между понятиями. Обычно он включает логический, структурный и вопросный подязыки. Каждое понятие связывают с его универсумом и конфигурацией. Универсум — это множество возможных примеров, а конфигурация — реальные примеры понятия. Описание на концептуальном языке создает концептуальную схему объекта. Со-

держание схемы зависит от области знаний, в которой оно составляется. Специалисты различного профиля, участвуя в изучении одного и того же объекта, создадут различные концептуальные схемы. Для системного анализа такие частные концептуальные схемы объединяют в общую.

В семиотике, науке о свойствах знаков и знаковых систем, знание подразделяют на экстенциональное и интенциональное. Экстенциональное знание часто просто называют данными. Понятие описано экстенционально, если задано множество его примеров. Это множество называют экстенсионалом понятия. Интенциональное знание о понятии представляет его смысловое содержание, характеризует свойства и их зависимости. Экстенциональное знание используется в БД, интенциональное — в прикладных программах.

Концептуальная схема использует экстенсиональные знания в качестве своих элементов, поэтому может строиться на существующих базах данных. Однако применение БД не обязательно, возможна и любая другая организация данных. Наиболее универсальным среди концептуальных языков оказывается язык ассоциативных схем (АС). Экстенсионалы понятий в АС представляются конфигурациями, т. е. примерами и контрпримерами. Каждый пример указывает структурные связи, задавая тем самым атрибуты понятий и области их значений.

Интенсионалы понятий в АС представляют в виде логических связок. Каждая логическая связка интерпретируется предикатом (коннектором). Логические связки, а следовательно, и коннекторы могут иметь практически любой характер. Однако нужно помнить, что любое расширение класса коннекторов ведет к снижению эффективности алгоритмов логического вывода, а сужение — к снижению выразительных возможностей языка. АС считается полностью определенной, если заданы множества: структурных связок (по одной для каждого понятия); логических связок; коннекторов (по одной для каждой логической связки) и, кроме того, универсальное множество объектов различных сортов, из которых могут быть составлены конфигурации. Полная непротиворечивая конфигурация, коннекторы которой имеют истинное знание, называется моделью.

Совокупность универсумов всех понятий, входящих в АС, составляет универсум всей АС. Возможные примеры, как элементы универсума АС, могут содержать не только константы, но и переменные. Дедуктивный вывод в АС заключается в построении новых конфигураций с помощью логических связок. Индуктивный вывод в АС состоит в построении логических связок на основе имеющихся конфигураций.

Воспользуемся приведенной в [3] формализацией языка ассоциативных схем. Любое понятие можно формально задать как тройку (C, U^c, E^c) , где C — имя (идентификатор) понятия; U^c — непустое множество, называемое универсумом понятия; E^c —

некоторое подмножество универсума. Например, понятие трансмиссия применительно к машинам может быть формально представлено следующим образом: C — трансмиссия; U^c — множество составных частей машины; E^c — составная часть машины, предназначенная для передачи и преобразования движения от двигателя к ходовому и рабочему оборудованию. Для создания АС выделяют необходимые понятия и указывают связи между ними, ограничивая тем самым их универсум и экстенционал. Различают структурные и логические связи. Структурные связи используются для представления универсумов, входящих в АС понятий, а логические — для спецификации экстенционалов. Языки описания связей носят соответственно названия структурного и логического.

Элементарные выражения структурного языка, называемые структурными связками, имеют вид $A [B_1, B_2, \dots, B_m]$, где A, B_j — имена понятий; A — называют «головой» структурной связи, а $[B_1, B_2, \dots, B_m]$ — «хвостом». Каждое понятие в составе хвоста обладает собственным универсумом U^{B_j} , поэтому конкретный объект описывается формой $[B_1 : x_1, \dots, B_m : x_m]$, где $x_j \in U^{B_j}$. Конечное множество ($S_{\text{стр}}$) структурных связок называют структурной схемой АС. Мощность $|S_{\text{стр}}|$ равна числу входящих в АС понятий. Структурная связка, в хвосте которой более одного элемента ($m > 1$), характеризует структурное понятие A , в противном случае A — понятие бесструктурное.

Универсум структурной схемы $S_{\text{стр}}$ есть множество $U = \{U^c, U | C \in C_n(S_{\text{стр}})\}$, где $C_n(S_{\text{стр}})$ — множество всех имен понятий, входящих в структурную схему; U^c — универсум понятия C ; U^c — отображение $U^c : U^c \rightarrow U^{[B_1, \dots, B_m]}$; $U^{[B_1, \dots, B_m]}$ — универсум составного понятия $[B_1, \dots, B_m]$.

Рассмотрим, к примеру, следующую структурную схему

$S_{\text{стр}} = \{\text{КАНАЛ} [\text{ТИП}, \text{КАТ. ГР.}, \text{РАЗМ.}], \text{МАШИНА} [\text{РАБ. ОРГ.}, \text{ТРАНСП.}, \text{НАВЕС.}, \text{ТРАНСМ.}, \text{ХОД.}, \text{АВТОМ.}]\}$.

В структурной схеме использованы обозначения: **ТИП** — тип канала; **КАТ. ГР.** — категория грунта; **РАЗМ.** — размер канала; **РАБ. ОРГ.** — рабочий орган; **ТРАНСП.** — транспортирующий орган; **НАВЕС.** — способ крепления рабочего органа; **ТРАНСМ.** — трансмиссия; **ХОД.** — ходовое оборудование; **АВТОМ.** — система автоматизации.

Универсумы понятий: $U_{\text{тип}} = \{\text{оросительный, осушительный}\}$; $U_{\text{кат. гр}} = \{\text{I, II, III, IV}\}$; $U_{\text{разм}} = \{\text{глубина, ширина}\}$; $U_{\text{раб. орг}} = \{\text{плужный, плужно-роторный, двухроторный, шнекороторный}\}$; $U_{\text{трансп}} = \{\text{плуг, ротор, конвейер, метатель}\}$; $U_{\text{навес}} = \{\text{навесной, полунавесной, прицепной}\}$; $U_{\text{трансм}} = \{\text{механическая, гидромеханическая, гидрообъемная, электрическая}\}$.

$U_{\text{ход}} = \{\text{гусеничный, колесный}\}; U_{\text{автом}} = \{\text{уровень, режим, стабилизация}\}.$

Структурные связи могут быть использованы для отработки принципов технических решений, выступающих в роли определенных понятий. В этом случае хвост структурной связи может быть представлен в виде $[p_1 : B_1, p_2 : B_2, \dots, p_m : B_m]$, где p_j — идентификаторы признаков; B_j — понятия, объекты которых описывают значение признака p_j . Если $e \in U^A$, то значение признака с именем p_i определяет i -й компонент $U^A(e)$.

Например, выберем в качестве признаков: p_1 — производительность, p_2 — надежность, p_3 — технологичность, p_4 — себестоимость, p_5 — эргономичность. Признак p_1 будет характеризоваться понятием B_1 (выработка в натуральном выражении) и пусть универсум понятия $U^{B_1} = \{\Pi | 10 \leq \Pi \leq 1000\}$. Признак p_2 охарактеризуем структурными понятиями B_2 . В его структурную связку войдут понятия: безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость. Из оставшихся признаков p_3 и p_5 также связаны со структурными понятиями. Признак p_4 , подобно p_1 , может быть выражен бесструктурным понятием, универсум которого определен на непрерывном множестве значений $\{U_{\text{руб}}\}$.

В качестве языка для описания логической схемы выбирается логический язык первого порядка, задаваемый набором из четырех множеств [26]

$$\Omega_{(1)} = \langle Srt, Cnst, Fn, Pr \rangle,$$

где Srt — непустое множество, элементы которого называются сортами объектов (для каждого сорта фиксируется счетный набор символов $a_1^{\pi}, a_2^{\pi}, \dots, a_n^{\pi}$; π — сорт объекта); $Cnst$ — множество (может быть и пустым) констант языка; Fn, Pr — множества символов функциональных и предикатных соответственно.

Для определенной структурной схемы $S_{\text{стр}}$ задают множество предложений многосортного языка. Причем каждому понятию соответствует сорт $\delta(A)$.

Рассмотрим применение АС для выбора типа электродвигателя. Структурную схему построим на множестве его признаков. Зададимся структурной связкой

$$\begin{aligned} \text{ТИП } [p_1 : \text{ЛОГ.}; p_2 : \text{ЛОГ.}; p_3 : \text{ЛОГ.}; p_4 : \text{ЛОГ.}; \\ p_5 : \text{МОЩН.}; p_6 : \text{РЕГ.}; p_7 : \text{ЛОГ.}]. \end{aligned} \quad (4.4)$$

В голове структурной связки представлено понятие ТИП электродвигателя, в хвосте идентификаторы обозначают признаки: p_1 — быстрый разгон; p_2 — постоянство скорости; p_3 — повышенный пусковой момент; p_4 — пожаро- и взрывобезопасность; p_5 — пределы мощности; p_6 — пределы регулирования; p_7 — плавность регулирования.

Понятие ЛОГ. означает логическую переменную, которая может принимать два значения Y и N (да и нет). Понятие МОЩН.

означает предел мощности. Выделим условно три группы: мощность до 200 кВт, мощность до 300 кВт и мощность без ограничения. Тогда универсум этого понятия $U_{\text{мощн.}} = \{200, 300, \text{без огр.}\}$.

Понятие РЕГ. выражает диапазон регулирования скорости, который условно разбит на две группы: в пределах от 1 до 4 и от 1 до 10, т. е. $U_{\text{РЕГ.}} = \{1-4, 1-10\}$.

Любой возможный объект e_i понятия ТИП может быть представлен структурной связкой при подстановке в (4.4) элементов универсумов понятий. Так, для e_1 (электродвигатель постоянного тока с последовательным возбуждением) имеем набор

$$e_1 = [p_1 : Y; p_2 : N; p_3 : N; p_4 : N; p_5 : 200; p_6 : 1-4; p_7 : Y].$$

Отображение понятия ТИП может быть представлено в виде решающей таблицы (табл. 4.6).

Т а б л и ц а 4.6

Таблица решений для выбора типа электродвигателя

Признак	Значение признака						
Быстрый разгон	Y	N	Y	—	Y	Y	—
Постоянство скорости	N	Y	N	Y	Y	Y	—
Повышенный пусковой момент	N	N	Y	—	Y	Y	—
Пожаро- и взрывобезопасность	N	N	N	N	Y	Y	—
Мощность до 200 кВт	Y	—	Y	—	Y	—	—
Мощность до 300 кВт	N	—	N	—	—	Y	—
Любая мощность	N	Y	N	Y	—	N	—
Пределы регулирования скорости 1—4	Y	Y	Y	Y	Y	Y	—
То же 1—10	N	N	N	Y	N	N	—
Плавность регулирования скорости	Y	Y	Y	Y	N	N	—
Решение	Указатель решения						
Электродвигатель постоянного тока с последовательным возбуждением	×						
То же с параллельным		×					
То же со смешанным			×	×			
Электродвигатель постоянного тока с питанием Г—Д							
Электродвигатель переменного тока, асинхронный короткозамкнутый					×		
То же с фазным ротором						×	
Электродвигатель специального исполнения							×

Примечание. У и N — значения логической переменной; «—» — условные «безразличия» к признаку; × — символ, указывающий соответствие набора признаков типу электродвигателя (на пересечении столбца и строки).

Задать набор признаков означает указать вектор с компонентами

$$(p_1 : \text{ЛОГ.}; \quad p_2 : \text{ЛОГ.}; \quad p_3 : \text{ЛОГ.}; \quad p_4 : \text{ЛОГ.}; \quad p_5 : \text{МОЩН.}; \\ p_6 : \text{РЕГ.}; \quad p_7 : \text{ЛОГ.}),$$

где ЛОГ., МОЩН., РЕГ. — соответственно понятия логической переменной, предела мощности и предела регулирования скорости, конфигурация которых задается конструктором.

Логическую схему АС выразим предикатом

$$\text{ТИП} \leftrightarrow \bigwedge_{i=1}^7 [(B_i = B'_i) \vee (B_i = -) \vee (B'_i = -)], \quad (4.5)$$

где B_i — составное понятие, включающее понятие ЛОГ. или МОЩН., или «безразличие» к признаку по структурной схеме; B_i — то же по вектору задания.

Выбор типа двигателя теперь сводится к установлению истинности предиката (4.5) при подстановке конфигураций, входящих в него понятий по структурной схеме и вектору задания.

Пусть задан вектор

$$(p_1 : Y; \quad p_2 : Y; \quad p_3 : Y; \quad p_4 : -; \quad p_5 : 200; \quad p_6 : -; \quad p_7 : -).$$

Утверждаем, ТИП — это электродвигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором.

Отыщем в решающей таблице столбец со значением признаков, соответствующий решению e_5 (электродвигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором).

Теперь установим истинность сложного высказывания соответствующего правой части (относительно знака $\leftrightarrow$) выражения предиката (4.5). Для этого последовательно сопоставляем компоненты вектора задания с содержимым столбца:

$$\bigwedge_{i=1}^7 [(B_i = B'_i) \vee (B_i = -) \vee (B'_i = -)] = [(B_1^T = B_1^T) \vee (B_1^F = -) \vee \\ \vee (B_1^F = -)] \wedge [(B_2^T = B_2^T) \vee (B_2^F = -) \vee (B_2^F = -)] \wedge \\ \wedge [(B_3^T = B_3^T) \vee (B_3^F = -) \vee (B_3^F = -)] \wedge \\ \wedge [(B_4^F = B_4^F) \vee (B_4^F = -) \vee (B_4^T = -)] \wedge \\ \wedge [(B_5^T = B_5^T) \vee (B_5^F = -) \vee (B_5^F = -)] \wedge \\ \wedge [(B_6^F = B_6^F) \vee (B_6^F = -) \vee (B_6^T = -)] \wedge \\ \wedge [(B_7^F = B_7^F) \vee (B_7^F = -) \vee (B_7^T = -)].$$

Знаки T и F над символами отношений означают соответственно истинность и ложность простых высказываний. Исчисляя истин-

ность сложных высказываний в квадратных скобках, найдем

$$\bigwedge_{i=1}^7 [(B_i = B'_i) \vee (B_i = -) \vee (B'_i = -)] = \\ = [T] \wedge [T] \wedge [T] \wedge [T] \wedge [T] \wedge [T] \wedge [T],$$

т. е. все сложные высказывания в квадратных скобках истинны.

Конъюнкция этих высказываний также истинна. Таким образом, выражение, соответствующее правой части предиката (4.5), — истинно. Оба выражения, входящие в операцию эквивалентности, истинны, и, следовательно, все составное высказывание — истинно. На этом основании утверждение о том, что заданным признакам удовлетворяет электродвигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором — правильно.

Таким образом, алгоритм выбора технического решения на основе семантического моделирования можно построить, используя решающие таблицы. Работу его в общих чертах представим так. В конкретной отрасли машиностроения создается БД как носитель концептуальной схемы. В нее включаются структурные описания всех известных технических решений по машинам в целом и по их составным частям. В БД, кроме того, должны храниться и описания изобретений по авторским свидетельствам и патентам. Организуя данные в форме решающих таблиц, можно воспользоваться одной из существующих реляционных БД.

Выбор технического решения сводится теперь к составлению логической схемы на основе функционального описания. В нее должны войти понятия и их отношения, характеризующие назначение проектируемого объекта, некоторые константы, относящиеся к рабочей функции объекта в целом и его составных частей, основные признаки. Для решения локальных задач, подобных приведенному примеру, базу данных можно организовать и в виде файлов. Схема алгоритма выбора типа электродвигателя представлена на рис. 4.8. На схеме использованы идентификаторы: $B(M, N)$ — массив данных, соответствующих правой верхней зоне решающей табл. 4.6; M — мощность множества признаков; N — мощность множества типов электродвигателей; $E(N)$ — массив типов электродвигателей; $B1(M)$ — массив, выражающий вектор задания.

Элементы массива $B(M, N)$ принимают значение:

$$B(I, J) = \\ = \begin{cases} 1 & \text{— если содержимое ячейки } (I, J) \text{ решающей таблицы } Y; \\ -1 & \text{— если содержимое } N; \\ 0 & \text{— если содержимое «—»}. \end{cases}$$

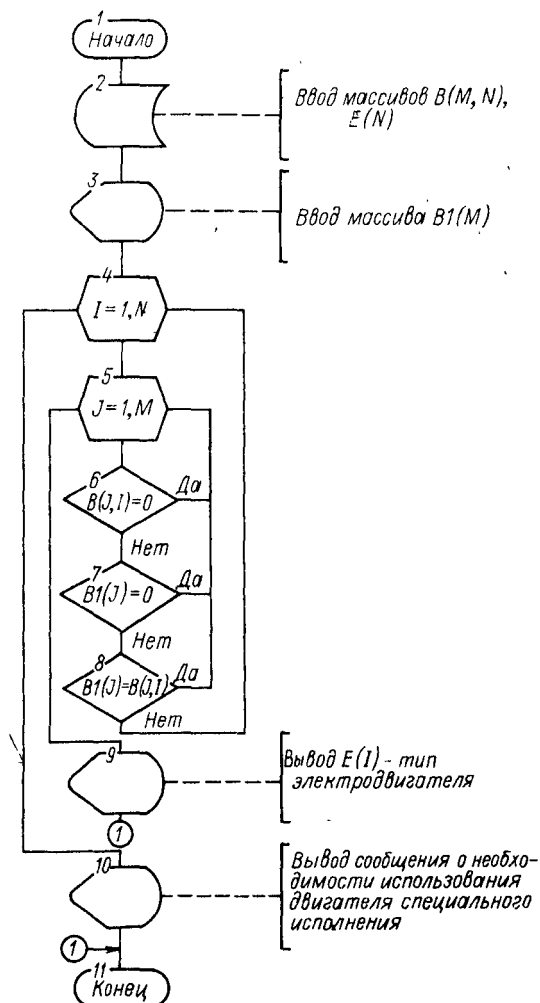


Рис. 4.8. Схема алгоритма выбора типа электродвигателя

Элементы массива $B1(M)$ принимают значение:

$$B1(I) = \begin{cases} 1, & \text{если признак включен в вектор задания;} \\ 0, & \text{если не включен в вектор задания;} \\ n - & \text{вещественное число, характеризующее значение признака.} \end{cases}$$

4.5. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Переходя к этапу проектирования, названному принятием решения, конструктор располагает некоторыми вариантами технического решения. Теперь ему нужно выбрать лучший из них. С подобными задачами встречаются не только при проектировании. Выбор того или иного действия из множества вариантов — ситуация, свойственная любой деятельности человека. В каждом случае ему нужно вначале дать оценку вариантам, затем эти оценки сравнить и только после этого выбрать вариант с наивысшей оценкой.

Руководствуясь основным принципом проектирования, эта процедура отвечает отображению множества вариантов технического решения на множество оценок и выбор оптимального из них:

$$(F : X_0 \rightarrow V) \rightarrow \text{opt.}$$

Выполнить процедуру принятия решений было бы просто, если бы все варианты можно было измерить по одной шкале. Однако в действительности каждый вариант характеризуется многими измерениями. Кроме того, не всегда можно воспользоваться абсолютной шкалой. Варианты технического решения представлены пока лишь принципиальной (структурной) схемой, и дать количественную оценку даже таким свойствам объекта, как масса, производительность, стоимость — сложно. Еще сложнее обстоит дело с оценкой надежности, эргономичности, эстетичности. Попытка уточнить количественные оценки по варианту технического решения приведет, по существу, к последующей его разработке, а это связано с трудовыми и временными расходами. Вот и приходится принимать решение в условиях неопределенности. И это еще не все. Сравнивать варианты зачастую приходится по многим их признакам, т. е. пользоваться несколькими шкалами. Причем по одной шкале лучшими оказываются одни варианты, по другой — иные.

И еще одно обстоятельство. Признаки, используемые для сравнения, неравнозначны: одни более важны, другие — менее. Некоторые из них противоречивы.

Охарактеризуем теперь общую постановку решаемой задачи.

1. Каждый вариант технического решения характеризуется некоторыми параметрами ρ_j ; $j = \overline{1, n}$.

2. Оценку вариантов производят по совокупности критериев:

$$V = \{v_i\}; \quad i = \overline{1, m}.$$

3. В качестве критериев выбираются признаки, отвечающие наиболее важным целям проектирования.

В такой постановке принятие решения примыкает к задачам многокритериальной оптимизации. Особенность таких задач состоит в том, что одновременное достижение оптимума по всем кри-

териям практически невозможно. Приходится идти на компромисс. В одних случаях он просто связан с уравниванием критериев, в других — с выбором из них главного.

Компромисс упрощает решение задачи, сводя ее в некоторых случаях к однокритериальной.

Схемы компромиссов могут строиться на основе следующих принципов [53]: равномерности, справедливой уступки, выделения главного критерия, последовательной уступки.

Принцип равномерности может требовать: 1) равенства всех критериев

$$\operatorname{opt}_{V \in \Omega_V^k} V = \operatorname{opt}_{V \in \Omega_V^k} V = \{\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = \dots = \bar{v}_k\} \in \Omega_V^k,$$

где Ω_V — отображение области возможных технических решений в пространстве V ; Ω_V^k — подмножество критериев, связанных с компромиссом; $\bar{v}_i$ — оптимальное значение элемента множества критериев; 2) «подтягивания» наихудшего из критериев $\operatorname{opt}_{V \in \Omega_V^k} V = \max_{V \in \Omega_V^k} \min v_i$; 3) квазиравенства критериев, т. е. равенства с допустимой погрешностью. Возможны и некоторые другие условия равномерности.

Принцип справедливой уступки требует или абсолютной, или относительной уступки. Абсолютная уступка считается справедливой, если суммарный абсолютный уровень снижения одного или нескольких критериев не превосходит суммарного абсолютного уровня повышения других критериев. Это условие обеспечивает максимальную сумму критериев, т. е.

$$\operatorname{opt}_{V \in \Omega_V^k} V = \max_{V \in \Omega_V^k} \sum_{i=1}^k v_i.$$

Относительная уступка обеспечивает справедливый компромисс, если суммарный относительный уровень снижения качества по одному или нескольким критериям не превосходит суммарного относительного уровня повышения качества по остальным критериям. Оптимальное по данной схеме компромисса решение таково, что переход от него к любому другому приводит к отрицательной или равной нулю суммарной относительной уступке:

$$\Delta_{\text{отн}} = \sum (v_i - \bar{v}_i)/\bar{v}_i \leq 0,$$

где $\Delta_{\text{отн}}$ — суммарная относительная уступка.

В теории принятия решений доказывается, что для оптимального решения, найденного по схеме суммарной относительной уступки, мультипликативная функция $f = \prod_{i=1}^k \bar{v}_i$ достигает максимума в области возможных компромиссных решений. На этом

основании принцип относительности имеет следующий вид:

$$\text{opt } V = \max_{V \in \Omega_V^k} \prod_{i=1}^k v_i.$$

Принцип выделения главного критерия сводит многокритериальную задачу к однокритериальной. Оптимизация происходит по главному критерию v_i^* ; на все остальные накладываются ограничения

$$\text{opt } V = \max_{\substack{v_i \geq v_i^* \\ v_i^* \in \Omega_V^3}} v_i^*,$$

где Ω_V^3 — область заданных значений критериев.

Принцип последовательной уступки позволяет отыскать оптимальное решение, отвечающее достижению максимума по всем критериям, размещаемым в ранжированной последовательности по степени их важности. Отыскание оптимального решения начинается с учета первого по важности критерия. Затем с учетом практических соображений и точности, с которой заданы исходные данные, назначается «уступка» по первому критерию Δv_1 . В пределах $\bar{v}_1$ и $\bar{v}_1 - \Delta \bar{v}_1$ ($\bar{v}_1$ — максимально возможное значение v_1) находится решение, отвечающее максимуму по второму критерию. Дальнейшие шаги состоят в «уступке» по второму и последующим критериям. В итоге находится компромиссное решение, у которого все критерии достигают максимума или находятся вблизи него, не выходя за пределы, установленные «уступкой» области. Если по условиям задачи нужно минимизировать тот или иной критерий, то не нарушая общности можно изменить его знак.

Решение многокритериальной задачи осложняется различием единиц измерения критериев. Исключение составляет принятие решения на основе принципа суммарной относительной уступки, где оперируют с относительными величинами, являющимися безразмерными. Во всех других случаях стремятся нормализовать критерии, что также связано с переходом к относительным показателям. Нормализованный вектор критериев имеет безразмерные компоненты, получаемые путем деления компонент рассматриваемого вектора на соответствующие компоненты некоторого идеального вектора

$$V^n = \{v_i^n\} = \left\{ \frac{v_i}{v_i^n} \right\}; \quad i = \overline{1, k},$$

где V^n — нормализованный вектор критериев; v_i^n — компоненты идеального вектора.

«Идеальный» вектор критериев может составляться по заданным или желаемым значениям его компонент

$$V^n = V^3 = \{v_i^3\}; \quad i = \overline{1, k},$$

где v_i^3 — заданное значение компонент.

За компоненты идеального вектора могут быть также приняты их возможные максимальные значения

$$V^u = \{\max_{v_i \in \Omega_V^k} v_i\}; \quad i = \overline{1, k}.$$

Иногда за компоненты идеального вектора принимают максимально возможный разброс по каждому локальному критерию

$$v_i^u = \max_{v_i \in \Omega_V^k} v_i - \min_{v_i \in \Omega_V^k} v_i.$$

Возможны и другие способы выбора идеального вектора критериев. Как уже отмечалось, одной из основных проблем решения многокритериальной задачи является проблема приоритета локальных критериев. На первом этапе критерии можно разместить в ряд по степени их важности (в данном случае используется шкала порядка). На основании ряда строится вектор приоритета $c_{\pi}(c_1, c_2, \dots, c_k)$, компоненты которого означают степень превосходства двух соседних критериев. При построении вектора приоритета используют шкалу интервалов; удобно начинать с последней компоненты c_k , приравняв ее единице (все остальные компоненты оказываются равными или большими единицы). По вектору приоритета строится весовой вектор. Компоненты его удовлетворяют условию:

$$\begin{cases} 0 \leq \lambda_i \leq 1; & i = \overline{1, k}; \\ \sum_{i=1}^k \lambda_i = 1. \end{cases} \quad (4.6)$$

В [53] доказывается, что условие (4.6) будет удовлетворено, если компоненты весового вектора находить по формуле:

$$\lambda_i = \frac{\prod_{i=q}^k c_i}{\sum_{i=1}^k \prod_{i=q}^k c_i}.$$

Компоненты весового вектора могут быть найдены с применением нормирующей функции [53]

$$\lambda_i = \frac{i}{2^{i-1}} / \sum_{i=1}^k \frac{i}{2^{i-1}}. \quad (4.7)$$

Выбор оптимального конструктивного решения в условиях многокритериальной задачи удобнее всего производить с использованием так называемой матрицы решений [58] на основе компромисса, построенного по принципу справедливой уступки (табл. 4.7).

Оценку вариантов можно выполнять попарным сравнением. Для этого все варианты рассматриваются последовательно по каждому критерию. Вначале отыскивается лучший вариант. Ему приписывается оценка 10. Затем с ним сравниваются все осталь-

Матрица решений

Вариант	Критерий и его вес					Комплексная оценка $\sum_{i=1}^k v_i^o \lambda_i$	Место
	v_1, λ_1	v_2, λ_2	v_3, λ_3	...	v_k, λ_k		
x_1	$v_1^o (v_1^o \lambda_1)$	$v_2^o (v_2^o \lambda_2)$	$v_3^o (v_3^o \lambda_3)$	..	$v_k^o (v_k^o \lambda_k)$		
x_2							
x_3							
...				...			
x_{m-1}							
x_m							
Примечание. v_i^o — оценка варианта по критерию v_i (в скобках произведение оценки по критерию v_i на его вес λ_i).							

ные. При этом множество оценок $\{1, 2, \dots, 10\}$ используется как шкала интервалов. Проще всего производить сравнение, когда параметры вариантов имеют численное значение. Когда же этого нет, следует руководствоваться опытом и интуицией. Для более обоснованных оценок можно воспользоваться экспертным методом. Для сравнения вариантов оказывается удобной и Генеральная определительная таблица (см. табл. 3.3). Критерии рассматриваются как характеристики, позиции соответствуют оценкам технического решения по каждому критерию.

Оптимальным вариантом при отыскании его по матрице решений будет тот, который отвечает условию:

$$\bar{x} = \max_{x \in X} \sum_{i=1}^k v_i^o \lambda_i, \quad v_i^o \in \{1, 2, \dots, 10\}$$

где v_i^o — оценка варианта по i -критерию.

При использовании ГОТ оптимальным считается тот вариант, который удовлетворяет следующему условию:

$$\bar{x} = \max_{x \in X} \tau_{\text{оп.}}$$

Зачастую получается так, что оптимальными оказываются несколько вариантов. Это имеет место или в случае действительной равнозначности вариантов, или в результате погрешностей в оценке параметров. Нельзя отбрасывать и те варианты, которые близки к оптимальным. В связи с этим возникает задача более уточненной оценки вариантов, требующая дополнительной информации. Получить ее можно в результате определенных исследований и дальнейших проектных разработок. Наиболее точная оценка может быть получена при разработке по каждому варианту рабочей документации и изготовлении опытного образца. Все это связано со значительными затратами времени и трудовых ресурсов. Задача оценки параметров относится к области статистических решений, а точнее — к статистическим играм с последовательными экспериментами. Решение такой задачи в общем виде применительно к проектированию еще не получено. Руководитель проекта в настоящее время принимает решение о дальнейшей разработке вариантов на основании собственного опыта и интуиции.

Выбранный вариант технического решения окончательно оценивается по критерию народнохозяйственной экономичности. На уровне интересов государства оптимальным вариантом технического решения будет тот, который обеспечивает снижение стоимости совокупной общественной продукции [61]:

$$\sum_{j=1}^{z_H} Q_j G_{Tj} \rightarrow \min,$$

где z_H — число типоразмеров конечной совокупности общественной продукции; Q_j — объем производства продукции j -го вида; G_{Tj} — индивидуальная стоимость единицы продукции.

Создание новых орудий труда требует дополнительных капиталовложений, которые берутся из фонда накопления. Направляя определенную часть ресурсов из фонда на создание и внедрение новых средств для получения нужной продукции в ту или иную область народного хозяйства, необходимо быть уверенным, что экономия на затратах в этой области будет больше, чем недополучаемая экономия в других областях, куда эти ресурсы не поступают. В этом и состоит критерий сравнительной народнохозяйственной экономичности сопоставимых вариантов. Мерой соответствия этому критерию выступают определенные показатели, которые по своей структуре могут быть частными и обобщенными. В качестве частных показателей используются: снижение трудоемкости продукции или рост производительности труда, высвобождение рабочих, снижение материалоемкости и энергоемкости. В качестве обобщенного показателя используются приведенные народнохозяйственные затраты. Экономический эффект от производства и использования новых средств труда долговре-

менного применения за срок их службы с учетом морального износа рекомендуется определять по формуле

$$\mathcal{E} = \left[3_1 \frac{B_{Г2} P_{A1} + E_H}{B_{Г1} P_{A2} + E_H} + \frac{(I'_1 - I'_2) - E_H (K'_2 - K'_1)}{P_{A2} + E_H} - 3_2 \right] A_{Г.},$$

где $3_1, 3_2$ — приведенные затраты, обусловленные производством базового (существующего) и нового средства, руб. ед.; $B_{Г1}, B_{Г2}$ — годовые объемы работ при использовании базового и нового средства в натуральных единицах; P_{A1}, P_{A2} — доля амортизационных отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление базового и нового средства (определяется как величина, обратная сроку службы средства с учетом морального старения); E_H — нормативный коэффициент эффективности; I'_1, I'_2 — годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании базового и нового средства; K'_1, K'_2 — капитальные вложения потребителя при использовании базового и нового средства в расчете на объем работ, производимых с помощью нового средства; $A_{Г.}$ — годовой объем производства новых средств.

При сравнении вариантов конструктивных решений предпочтительное отдается тому из них, который обладает большим значением ожидаемого экономического эффекта.

Обратимся к примеру принятия решения при проектировании устройства для разработки мерзлых грунтов. В качестве критериев используем основные признаки объекта проектирования. Ранжирование критериев произведено с учетом важности связанных с ними целей проектирования: v_1 — производительность устройства; v_2 — расход энергии; v_3 — надежность устройства; v_4 — затраты на проектирование, подготовку производства и изготовление; v_5 — степень новизны устройства; v_6 — срок проектирования и изготовления; v_7 — трудоемкость управления и обслуживания устройств; v_8 — условия труда; v_9 — эксплуатационные расходы; v_{10} — возможность изготовления своими силами. Для оценки компонентов весового вектора воспользуемся зависимостью (4.7). Тогда получим: $c_{\pi} = (0,25; 0,25; 0,18; 0,13; 0,08; 0,05; 0,032; 0,015; 0,008; 0,005)$.

Матрица решений приведена в табл. 4.8. Наиболее производительными устройствами можно считать те, которые производят непрерывное резание и перемещение разрушенной породы на поверхность массива. К таким устройствам относятся: $x_5, x_2, x_3, x_4, x_{11}$. Указанным вариантам поставлена оценка — 10, всем остальным оценки установлены на основании попарных сравнений. По расходу энергии наибольшую оценку заслуживают варианты, обеспечивающие разрушение мерзлого грунта в минимально необходимом для щели объеме. К таким вариантам следует отнести: x_3, x_2 . Наиболее надежными можно считать устройства, производящие оттаивание мерзлого грунта. Это варианты: x_7, x_9, x_{12} .

**Матрица решений при выборе оптимального варианта машины
для нарезания щелей в мерзлом грунте**

Вариант	Критерий и его вес										Комплексная оценка $\sum v_i^0 \lambda_i$	Место
	$v_1, \lambda_1 = 0,25$	$v_2, \lambda_2 = 0,25$	$v_3, \lambda_3 = 0,18$	$v_4, \lambda_4 = 0,13$	$v_5, \lambda_5 = 0,08$	$v_6, \lambda_6 = 0,05$	$v_7, \lambda_7 = 0,032$	$v_8, \lambda_8 = 0,015$	$v_9, \lambda_9 = 0,008$	$v_{10}, \lambda_{10} = 0,005$		
x_1	6 (1,5)	5 (1,25)	8 (1,44)	10 (1,3)	5 (0,4)	10 (0,5)	7 (0,224)	7 (0,105)	10 (0,08)	10 (0,005)	6,849	7
x_2	10 (2,5)	10 (2,5)	8 (1,44)	10 (1,3)	5 (0,4)	10 (0,5)	10 (0,32)	10 (0,15)	8 (0,064)	10 (0,05)	9,224	2
x_3	10 (2,5)	10 (2,5)	8 (1,44)	8 (1,04)	10 (0,8)	10 (0,5)	10 (0,32)	10 (0,15)	8 (0,064)	10 (0,05)	9,364	1
x_4	10 (2,5)	9 (2,25)	8 (1,44)	10 (1,3)	5 (0,4)	10 (0,5)	10 (0,32)	10 (0,15)	8 (0,064)	10 (0,05)	9,224	2
x_5	10 (2,5)	8 (2,0)	8 (1,44)	8 (1,04)	10 (0,8)	8 (0,4)	10 (0,32)	10 (0,15)	8 (0,064)	10 (0,05)	8,764	3
x_6	5 (1,25)	5 (1,25)	8 (1,44)	9 (1,17)	6 (0,48)	10 (0,5)	7 (0,224)	7 (0,105)	10 (0,08)	10 (0,05)	6,549	8

Вариант	Критерий и его вес										Комплексная оценка $\sum v_i^0 \lambda_i$	Место
	$v_1, \lambda_1 = 0,25$	$v_2, \lambda_2 = 0,25$	$v_3, \lambda_3 = 0,18$	$v_4, \lambda_4 = 0,13$	$v_5, \lambda_5 = 0,08$	$v_6, \lambda_6 = 0,05$	$v_7, \lambda_7 = 0,032$	$v_8, \lambda_8 = 0,015$	$v_9, \lambda_9 = 0,008$	$v_{10}, \lambda_{10} = 0,005$		
x_7	4 (1,0)	4 (1,0)	10 (1,8)	10 (1,3)	5 (0,4)	10 (0,5)	7 (0,224)	7 (0,105)	5 (0,04)	10 (0,05)	6,419	9
x_8	8 (2,0)	5 (1,25)	7 (1,26)	8 (1,04)	7 (0,56)	10 (0,5)	6 (0,192)	6 (0,09)	5 (0,04)	10 (0,05)	6,982	6
x_9	4 (1,0)	4 (1,0)	10 (1,8)	10 (1,3)	5 (0,4)	10 (0,5)	6 (0,192)	8 (0,12)	5 (0,04)	10 (0,05)	6,402	10
x_{10}	8 (2,0)	7 (1,75)	6 (1,08)	6 (0,78)	10 (0,8)	7 (0,35)	5 (0,16)	5 (0,075)	5 (0,04)	5 (0,025)	7,06	5
x_{11}	10 (2,5)	7 (1,75)	7 (1,26)	5 (0,65)	10 (0,8)	6 (0,3)	5 (0,16)	5 (0,075)	5 (0,04)	5 (0,025)	7,56	4
x_{12}	4 (1,0)	4 (1,0)	10 (1,8)	10 (1,3)	5 (0,4)	10 (0,5)	7 (0,224)	7 (0,105)	5 (0,04)	10 (0,05)	6,419	9

Устройства механического разрушения обладают приблизительно одинаковой надежностью. Наименьшие затраты связаны с вариантами, представляющими собой уже существующие устройства. Это $x_1, x_2, x_4, x_7, x_9, x_{12}$. Наибольшей новизной отличаются устройства: x_3, x_5, x_{10}, x_{11} .

По срокам проектирования и изготовления предпочтение следует отдать вариантам, имеющим прямой аналог: $x_1, x_2, x_4, x_3, x_6, x_7, x_9, x_{12}$. Наименьшей трудоемкостью в управлении и обслуживании обладают устройства непрерывного резания: x_2, x_3, x_4, x_5 . Они же отвечают лучшим условиям труда. Варианты x_{10}, x_{11} связаны с использованием СВЧ магнитного поля, что небезопасно для обслуживающего персонала.

Наименьшим эксплуатационным расходам отвечают варианты x_1, x_6 . Все другие устройства механического разрушения требуют периодической замены резцов. Технические решения, построенные на термическом и термомеханическом разрушении, связаны со значительным эксплуатационным расходом на топливо и электроэнергию. Сточки зрения возможности изготовления силами заказчика все варианты, кроме x_{10}, x_{11} , приблизительно равнозначны.

Как следует из табл. 4.8, первое место занял вариант x_3 . Близкими к нему оказались варианты x_2 и x_4 . Вариант x_4 представляет собой существующую машину. Его необходимо сопоставить с x_3 по показателю экономического эффекта. Преимущество конструкции по варианту x_3 в сравнении с вариантом x_2 состоит в следующем: возможно создание рабочего оборудования для разработки более узкой щели, что влечет уменьшение энергоемкости на единицу длины прорези; в конструкции рабочего оборудования по варианту x_3 нет цепи, перемешаемой звездочками в грунтовой абразивной среде, что обеспечивает большую надежность и КПД; фреза при полном заглублении испытывает прижатие к забою, что повышает сцепление с грунтом движителей машины, увеличивает силу тяги.

На этапе принятия решения еще не известны окончательные параметры нового технического устройства. Экономическое сравнение имеет приближенный характер. Но оно ориентирует конструктора на последующих этапах проектирования в выборе технических решений по составляющим узлам и позволяет использовать при этом ФСА. При проектировании сложных технических систем, обладающих большим числом частных функций и средств их реализации, особенно с использованием формальных методов (например, таблицы приемлемости), может возникнуть ситуация, при которой анализ каждого из вариантов на соответствие целям проектирования становится практически неосуществимым. Так, если система обладает 10 частными функциями и каждая из них может быть реализована 5 средствами, то общее число вариантов составит $5^{10} = 9\ 765\ 625$.

В таких условиях даже использование быстросействующих ЭВМ займет весьма большое время. Для сокращения операции

анализа можно предварительным просмотром исключить из таблицы абсурдные варианты, но и это становится весьма трудоемким, если общее число возможных технических решений, как в приведенном примере, приближается к 10 миллионам.

Возникает задача вычислительной оценки с предварительным исключением абсурдных и неконкурентоспособных вариантов. Методы решения такой задачи находим, например в [31]. В основу их положен принцип представления процесса решения в виде многоступенчатой структуры. Каждая ступень связана с проверкой наличия тех или иных свойств у подмножества вариантов, по которым либо непосредственно сокращается исходное множество, либо подготавливается возможность такого сокращения в будущем. Одним из правил отсева бесперспективных вариантов является принцип монотонной рекурсивности, применяемый для решения задач дискретной оптимизации при пошаговом конструировании вариантов.

Назовем управляющим воздействием выбор того или иного средства для реализации i -й частной функции. Управляющие воздействия дискретны и составляют конечное множество

$$U_i = \{u_{ij}\}; \quad j = \overline{1, k_n}.$$

Полное множество решений составляет декартово произведение множеств

$$X = \prod_{i=1}^n U_i.$$

Число элементов множества X определяется как

$$N = \prod_{i=1}^n k_i.$$

Каждый из них представляет возможное техническое решение

$$x_i = \{u_1(k_1), \dots, u_i(k_i), \dots, u_n(k_n)\}.$$

Пусть $\bar{x}_i \in X$ — оптимальное техническое решение, т. е. отвечает минимуму целевой функции

$$\min f(u_1(k_1), \dots, u_i(k_i), \dots, u_n(k_n))$$

при ограничениях

$$g_p(u_1(k_1), \dots, u_i(k_i), \dots, u_n(k_n)) \leq g_p^*, \quad (4.8)$$

где f, g_p ($p = 1, 2, \dots, q$) — произвольные функции дискретного аргумента.

Возможные решения будем считать допустимыми, если они удовлетворяют условию (4.8).

Введем в рассмотрение вектор

$$x_{(s)} = \{u_1(k_1), \dots, u_s(k_s)\}, \quad s \leq n$$

и назовем его s -частным решением (решение, включающее часть функциональных элементов).

Если $s = n$, получим «полное» решение; частичное решение, которое можно достроить до допустимого полного решения, назовем допустимым частичным решением.

Пошаговым конструированием будет считаться процесс поэтапной достройки частичных решений до полных с проверкой на каждой стадии (шаге) условий ограничения (4.8) и определением значений целевой функции. Такая проверка и сравнение производятся с помощью тестов.

Итак, задача пошагового конструирования на основе матрицы приемлемости сводится к выбору целевой функции f , функции (функций) ограничений g_r , правила выбора частичных решений и набора тестов σ , осуществляющих отсев частных решений, которые не могут быть достроены до оптимальных. В набор σ входят тесты анализа допустимых решений ξ_0 и ξ_1 — сравнения решений по значению целевой функции.

Вычислительная процедура последовательного анализа и отсева вариантов может быть еще более сокращена при использовании метода, исключающего необходимость построения начальной части вариантов и их дальнейшего развития. В нем производится пошаговый отсев вариантов по каждому из ограничений. Алгоритм выполнения такого метода и область его возможного применения можно найти в [31].

Оба из упомянутых вычислительных метода решают однокритериальную задачу. Поэтому для их использования предварительно следует, воспользовавшись компромиссом, выделить главный критерий, а остальные отнести в разряд ограничений.

Вместе с сокращением числа вариантов на этапе принятия решений может в определенной ситуации возникнуть принципиально иная задача. Достаточно ли было взято вариантов для сравнения? Не нужно ли продолжить поиск вариантов? Попытаемся найти метод, с помощью которого можно ответить на эти вопросы. Воспользуемся Байесовой теорией принятия решения на конкретном примере постановки интересующей нас задачи.

Допустим, что в ходе выполнения процедуры поиска технических решений найдены три варианта; в дальнейшем возможно: 1) продолжить поиск других вариантов; 2) провести анализ разработанных вариантов с целью более обоснованного выбора; 3) не проводить дополнительный анализ, а принимать решение на основе имеющейся информации. Какое предпринять действие?

Рассмотрим решение задачи в форме алгоритма.

1. Составить список всех возможных операций (в задаче их две: α_1 — приступить к выбору технического решения, α_2 — продолжить исследование).
2. Составить список всех возможных состояний.

Ограничимся для упрощения примера двумя состояниями: Θ_1 — найдено удовлетворительное решение, Θ_2 — удовлетворительное решение не найдено.

3. Составить список всех возможных экспериментов $\{e_i\}$, включая нулевой e_0 , под которым понимается отказ от проведения эксперимента.

В задаче под экспериментами понимается: e_1 — продолжить поиск новых вариантов; e_2 — проанализировать уже найденные варианты; e_0 — не проводить никаких экспериментов (нулевой эксперимент).

4. Для каждого эксперимента составить список возможных результатов.

Поиск новых вариантов (эксперимент e_1) может привести к двум результатам: z_1 — будет найдено новое техническое решение, отличающееся более высокими показателями, по сравнению с уже имеющимися; z_2 — не будет найдено новое решение. Эксперимент e_2 может привести также к двум результатам: z_3 — получена новая информация для более обоснованного принятия решения, z_4 — новой информации не будет получено. Нулевой эксперимент e_0 дает неопределенный результат z_0 . Для наглядности представим задачу в виде графа, маршруты которого отражают все возможные последовательности — эксперимент, результат, операция, состояние (рис. 4.9).

5. Определить для каждой комбинации (эксперимент, результат, операция, состояние) ее «выгоду».

Понятие выгоды выполнения тех или иных операций при проектировании заслуживает специального рассмотрения. Пока же ее выразим условно в баллах. Причем разобьем ее на две части: выгоду от эксперимента $u(e, z)$ и выгоду от операции $u(o, \Theta)$. Общая выгода в этом случае составит $u(e, z, o, \Theta) = u(e, z) + u(o, \Theta)$. Рассуждаем так. Проведение эксперимента e_1 , т. е. продолжение поиска новых вариантов, приведет к наибольшим, по сравнению с другими экспериментами, расходам времени и трудовых ресурсов. Если при этом будет получен результат z_1 (появится новое техническое решение, отличающееся от имеющихся), то выгоду от e_1 оценим условно одним баллом, т. е. $u(e_1, z_1) = 1$. При результате z_2 , когда поиск не дает новых решений, «выгода» будет отрицательной, пусть $u(e_1, z_2) = -5$. Выгода от эксперимента e_2 , предусматривающего проведение анализа уже найденных технических решений при результате z_3 , дающем новую полезную информацию для обоснованного принятия решения — положительна, несмотря на дополнительные затраты времени и трудовых ресурсов. Пусть $u(e_2, z_3) = 1$. Эксперимент e_2 при результате z_4 приведет к отрицательному результату; будут затрачены дополнительные ресурсы времени и труда, а полученная информация не окажется полезной для принятия решения. Принимаем $u(e_2, z_4) = -1$. Выгоду от нулевого эксперимента примем равной 0, т. е. $u(e_0, z_0) = 0$. Обратимся к оценке выгоды от опе-

			$u(\varepsilon, z, o, \theta)$	$p'(\theta z, \varepsilon)$	$u^*(z, \varepsilon)$	$u^*(z, \varepsilon)$	$p(z \varepsilon)$	$u^*(\varepsilon)$
ε_1	z_1	o_1	θ_1	6	0,37	2,22	2,22	0,38
		o_2	θ_1	-2	0,63	-1,26		
		o_1	θ_2	5	0,37	1,85		
		o_2	θ_2	-4	0,63	-2,52		
	z_2	o_1	θ_1	0	0,9	0	0	0,62
		o_2	θ_1	-8	0,1	-0,8		
		o_1	θ_2	-1	0,9	-0,9		
		o_2	θ_2	-10	0,1	-1		
ε_2	z_3	o_1	θ_1	6	0,5	3	3	0,42
		o_2	θ_1	-2	0,5	-1		
		o_1	θ_2	5	0,5	0,25		
		o_2	θ_2	-4	0,5	-0,2		
	z_4	o_1	θ_1	4	0,84	3,36	3,36	0,58
		o_2	θ_1	-4	0,16	-0,64		
		o_1	θ_2	3	0,84	2,52		
		o_2	θ_2	-6	0,16	-0,96		
	z_0	o_1	θ_1	5	0,7	0,35	2,8	1
		o_2	θ_1	-3	0,3	-0,9		
		o_1	θ_2	4	0,7	2,8		
		o_2	θ_2	-5	0,3	-1,5		

Рис. 4.9. Схема процедуры принятия решений по выбору оптимальных действий на этапе анализа вариантов технических решений

раций. Переход в данный момент времени процесса проектирования к выбору варианта технического решения (операция o_1) при возникновении в дальнейшем ситуации θ_1 (найденно удовлетворительное решение с точки зрения достижения поставленной цели) сокращает время разработки и, следовательно, сулит положительную выгоду. Пусть она оценивается пятью баллами, т. е. $u(o_1, \theta_1) = 5$. В случае неудовлетворительного решения выгода отрицательна. Примем $u(o_1, \theta_2) = -3$. Операция o_2 (продолжение исследований) в случае состояния θ_1 дает положительную выгоду, но несколько меньшую, чем при операции o_1 и состоянии θ_1 . Пусть $u(o_2, \theta_1) = 4$. Операция же o_2 и состояние θ_2 приводят к более отрицательным результатам, чем при операции o_1 и том же состоянии. Поэтому принимаем условно $u(o_2, \theta_2) = -5$.

6. Определить априорное распределение вероятности различных состояний $p'(\theta)$ и вероятностей $p(z|\varepsilon, \theta)$.

Пусть априорная вероятность получения в конце процесса проектирования технического решения, удовлетворяющего по-

ставленным целям, по опыту прошлых разработок выше, чем вероятность неудачных решений. Априори принимаем $p'(\Theta_1) = 0,7$, тогда $p'(\Theta_2) = 0,3$, так как события Θ_1 и Θ_2 составляют полную группу и $p'(\Theta_1) + p'(\Theta_2) = 1$. Определяя условную вероятность $p(z|\varepsilon, \Theta)$, мы идем как бы от обратного. Переменная состояния Θ_i получила то или иное значение. Ставится вопрос — какова вероятность результата z_i в эксперименте ε_i в условиях состояния Θ_i ?

Оценим вероятность результата z_1 при условии проведения эксперимента ε_1 и значении переменной состояния Θ_1 . Рассуждаем так. Вероятность того, что при получении окончательного удовлетворительного технического решения проведение дополнительного поиска варианта (эксперимент ε_1) приведет к отысканию нового более удовлетворительного (по сравнению с уже имеющимися), сравнительно невелика. Пусть $p(z_1|\varepsilon_1, \Theta_1) = 0,2$, тогда $p(z_2|\varepsilon_1, \Theta_1) = 0,8$, как вероятность событий входящих с $p(z_1|\varepsilon_1, \Theta_1)$ в полную группу. Остальные значения условных вероятностей результатов эксперимента ε_1 определяются по симметрии: $p(z_1|\varepsilon_1, \Theta_2) = 0,8$; $p(z_2|\varepsilon_1, \Theta_2) = 0,2$.

Вероятность результата z_3 (получение новой информации для более обоснованного принятия решения) при выполнении эксперимента ε_2 (проанализировать найденные варианты), если получен удовлетворительный результат, невелика. И, напротив, в случае отрицательного результата вероятность того, что при анализе могла быть получена новая информация — велика. Принимаем $p(z_3|\varepsilon_2, \Theta_1) = 0,3$; $p(z_3|\varepsilon_2, \Theta_2) = 0,7$. Для результата z_4 справедливо обратное заключение, т. е. $p(z_4|\varepsilon_1, \Theta_1) = 0,7$, а $p(z_4|\varepsilon_2, \Theta_2) = 0,3$. Получение неопределенного результата в нулевом эксперименте можно считать достоверным событием, поэтому $p(z_0|\varepsilon_0, \Theta_1) = 1,0$ и $p(z_0|\varepsilon_0, \Theta_2) = 1,0$.

7. Вычислить апостериорные распределения вероятностей.

Воспользуемся формулой Байеса

$$p''(\Theta_1|z_1, \varepsilon_1) = \frac{p'(\Theta_1) p(z_1|\Theta_1)}{p'(\Theta_1) p(z_1|\varepsilon_1, \Theta_1) + p'(\Theta_2) p(z_1|\varepsilon_1, \Theta_2)} =$$

$$= \frac{0,7 \cdot 0,2}{0,7 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,8} = 0,37;$$

$$p''(\Theta_2|z_1, \varepsilon_1) = \frac{p'(\Theta_2) p(z_1|\Theta_2)}{p'(\Theta_2) p(z_1|\varepsilon_1, \Theta_2) + p'(\Theta_1) p(z_1|\varepsilon_1, \Theta_1)} =$$

$$= \frac{0,3 \cdot 0,8}{0,3 \cdot 0,8 + 0,7 \cdot 0,2} = 0,63.$$

Остальные значения апостериорных вероятностей представлены на рис. 4.9.

8. Определить ожидаемую выгоду от каждой операции для каждой комбинации (эксперимент, результат) по формуле

$$u^*(o, z, \varepsilon) = \sum_{\Theta} p''(\Theta|z, \varepsilon) u(o, z, \varepsilon, \Theta).$$

Результаты представлены на рис. 4.9.

9. Для каждой операции (эксперимент, результат) определяется оптимальная операция и относительная выгода

$$u^*(z, \varepsilon) = \max_o u^*(o, z, \varepsilon).$$

Результаты представлены на рис. 4.8.

10. Для каждого эксперимента вычисляется вероятность результатов в экспериментах $p(z|\varepsilon)$ по формуле

$$p(z|\varepsilon) = \sum_{\Theta} p'(\Theta) p(z|\varepsilon, \Theta).$$

Так, для эксперимента ε_1 вероятность результата z_1 определяется как

$$p(z_1|\varepsilon_1) = \sum_{\Theta} p'(\Theta) p(z_1|\varepsilon, \Theta) = 0,7 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,8 = 0,38.$$

Остальные вероятности результатов экспериментов проставлены на рис. 4.8.

11. Для каждого эксперимента определить ожидаемую выгоду

$$u^*(\varepsilon) = \sum_z p(z|\varepsilon) u^*(z, \varepsilon).$$

Например, для эксперимента ε_1

$$\begin{aligned} u^*(\varepsilon_1) &= p(z_1|\varepsilon_1) u^*(z_1|\varepsilon_1) + p(z_2|\varepsilon_1) u^*(z_2|\varepsilon_1) = \\ &= 0,38 \cdot 2,22 + 0,62 \cdot 0 = 0,84. \end{aligned}$$

Остальные результаты представлены на рис. 4.8.

12. Определить оптимальный эксперимент

$$u^*(\varepsilon) = \max_{\varepsilon} u^*(\varepsilon).$$

В примере наибольшим из множества значений $u^*(\varepsilon)$ оказалась величина $u^*(\varepsilon_2) = 3,2$. На этом основании принимаем решение о прекращении на рассматриваемом этапе проектирования поиска новых вариантов и о целесообразности проведения дополнительного анализа уже имеющихся вариантов.

13. Конец.

4.6. АНАЛИЗ ПРИНЯТОГО ВАРИАНТА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Процедура анализа принятого решения на этапе разработки технических предложений проводится в целях получения необходимой информации об объекте проектирования. К моменту выполнения процедуры составлено лишь структурное описание. В ходе анализа проверяются работоспособность объекта, особенности его взаимодействия с факторами окружения, взаимосвязи составляющих подсистем и элементов.

В настоящее время существует целый арсенал методов анализа. Разобьем их условно на три вида: эвристический, аналитический (включая графоаналитический) и экспериментальный.

Первый вид анализа — эвристический, «добывает» ту или иную информацию на основе преобразований чувственно-образных моделей, возникающих в сознании человека. Значительную роль здесь играют воображение и интуиция. Опытный конструктор, длительное время работающий в той или иной области техники, способен предсказать поведение объекта в тех или иных ситуациях. Он как бы вживается в его роль и может за него ответить на внешние раздражители. Эвристические методы анализа включают и мозговой штурм, и синектику.

Аналитические методы используют формализованные модели, дающие возможность расчетным путем установить внешние или внутренние параметры. Так, могут быть определены степень подвижности механизмов, энергоемкость и материалоемкость, себестоимость, надежность и т. д. Графоаналитические методы используют описание объекта чаще всего в виде кинематических схем.

Экспериментальные методы связаны с испытанием моделей или натурного образца объекта. Модели могут быть как математическими, так и физическими.

Вообще процедура анализа технического решения по готовой принципиальной или кинематической схеме достаточно хорошо изучена. Она использует знания, добытые целым рядом классических научных дисциплин: теоретической механики, теории машин и механизмов, теплотехники, электротехники, гидравлики и др. Поэтому мы остановимся лишь на тех моделях и методах, которые появились сравнительно недавно в связи с развитием САПР.

Основное внимание уделим аналитическим и экспериментальным методам. Причем среди экспериментальных нас в большей степени будут интересовать вычислительные эксперименты. Для анализа мы должны иметь некоторую исходную информацию в виде математической модели. На этапе разработки технических предложений при проектировании сложных систем модель отражает взаимодействие основных подсистем друг с другом и с окружающей средой. Таким образом, математические модели на данном этапе соответствуют мета- и макроуровню.

Рассмотрим вначале представление модели объекта на метауровне. Создавая новый образец техники, конструктор должен позаботиться и о его жизнеобеспечении. Таким образом, удовлетворение той или иной потребности общества, выраженной в заявке на проектирование, достигается не только самим новым изделием, но целым комплексом технических средств (КТС), включая средства эксплуатации и ремонта. Подход, связанный с представлением объекта проектирования как средства для удовлетворения определенной заявки на обслуживание потребностей общества,

предопределяет метод математического моделирования. В его основу должна быть положена теория массового обслуживания. Используя ее основные понятия, в работе [18] введены следующие определения.

1. Совокупность технических устройств, машин, аппаратов, сооружений или их комплексов, предназначенных для выполнения полного набора однотипных работ в народном хозяйстве, называется обслуживающей системой (ОС).

2. Каждая отдельная работа, требуемая от ОС, называется требованием на обслуживание (Т). Требования на обслуживание отличаются друг от друга признаками и их значениями.

3. Выполнение работ по обслуживанию требований названо обработкой требований.

4. Признаки требований определяют качественные характеристики системы обслуживания. Признаки могут иметь непрерывное множество значений в пределах нижнего и верхнего ограничения. Весь континуум признаков разбивают на диапазоны, каждый из них представляется или максимальным в его пределах значением признака, или минимальным, или средним.

5. Совокупность диапазонов значений признаков образует дискретное множество — градационные шкалы. Каждое значение признака, кроме самого нижнего и самого верхнего, является одновременно наибольшим значением предыдущего и наименьшим значением последующего диапазона.

6. Требования на обработку характеризуются совокупностью признаков и их значениями.

7. Требования с одинаковыми признаками и их значениями относятся к одному классу и называются однородными.

8. Совокупность требований, относящихся к одному классу и подлежащих обработке в течение определенного промежутка времени, называется заявкой на обслуживание.

9. Совокупность всех заявок на обслуживание, предъявляемых к системе обслуживания, называется портфелем заявок.

10. Каждое требование на обслуживание выполняется одним обслуживающим устройством. И требование, и обслуживающее устройство характеризуются одним и тем же набором признаков и их значений.

11. Совокупность признаков и их значений, характеризующих обслуживающие устройства, предназначенные для обработки требований, относящихся хотя бы к одному классу, называется типоразмером обслуживающего устройства.

12. Типоразмер, предназначенный для обработки требований из различных заявок, называется унифицированным.

13. Совокупность всех обслуживающих устройств одного типоразмера для обработки всех требований одной или нескольких заявок, называется серией типоразмера.

14. Совокупность типоразмеров для обработки всех требований из портфеля заявок называется параметрическим рядом или типажом.

15. Всю совокупность серий типоразмеров, входящих в параметрический ряд, называют полной серией типоразмеров.

16. Портфель заявок обслуживается полной серией всех типоразмеров, входящих в параметрический ряд.

17. Отношение числа заявок к числу типоразмеров составляет меру степени унификации.

18. Совокупность всех технических средств, обеспечивающих обработку требований на обслуживание, называют комплексом технических средств (КТС). В комплексе один из компонентов выполняет основные операции, а остальные обеспечивают его работоспособность.

19. Обслуживающие устройства, допускающие взаимозаменяемость всех комплексов, входящих в одну серию, и элементов КТС, называют стандартными.

20. Требования, распределенные во времени, образуют поток.

21. Количество требований, поступающих в обслуживающую систему в течение единицы времени, называют мощностью потока.

22. Часть заявок, обрабатываемых одним типоразмером унифицированных КТС, составляет ветвь потока. Каждая ветвь разветвляется на подветви.

23. Каждой подветви соответствует один КТС.

24. Распределение КТС в пространстве образует сеть системы обслуживания.

25. Любая ветвь потока проходит через сеть КТС только один раз, так как на каждое обслуживание составляется требование независимо от всех предыдущих и последующих.

26. Максимальная совокупность требований любого типа для одновременного обслуживания системой составляет поле требований. В нем можно выделить подмножество для обработки КТС одного типоразмера.

27. Критерием оптимальности системы обслуживания, КТС или его самостоятельно функционирующих узлов является сумма собственных затрат на проектирование, производство и эксплуатацию соответствующего объекта.

28. Критерием эффективности называют отношение доходов, полученных в процессе эксплуатации системы обслуживания, КТС или изделия, к затратам на проектирование, производство и эксплуатацию соответствующего объекта.

Первый критерий следует минимизировать, а второй — максимизировать. Стоимость всего изделия выражается через стоимость его комплектующих, но ее можно рассматривать и как величину затрат на достижение заданного значения вектора выходных параметров, причем это относится как к изделию в целом, так и к его составным частям. Зависимость между техническими параметрами КТС и его стоимостью теоретически установить весьма затруднительно. Однако можно использовать предшествующий опыт создания КТС, собрав и обработав статистику. На базе этих данных принципиально возможно методами факторного

и регрессионного анализа построить приближенные аналитические зависимости от значений составляющих вектора внешних параметров. В данном случае предлагается использовать функцию Кобба — Дугласа, имеющую следующий вид:

$$\sigma = k \prod_{j=1}^m x_j^{\alpha_j},$$

где σ — величина, характеризующая стоимость изделия; k — константа; x_j — j -я составляющая вектора внешних параметров X ; α_j — некоторая константа, характеризующая вес затрат для достижения заданного значения j -й составляющей вектора качества; m — число внешних параметров.

Анализируя объект проектирования как КТС, нельзя ограничиваться только стоимостными характеристиками его подсистем; необходимо учитывать динамику изменения технико-экономических процессов. Одним из их факторов является моральное старение. Проектируя КТС, необходимо прогнозировать длительность его генерального цикла существования (проектирование, подготовка производства, изготовление, эксплуатация, снятие с производства). Весьма важно установить оптимальный срок опытно-конструкторской разработки КТС. Сокращение срока проектирования достигается улучшением организации труда, увеличением размеров денежных вкладов и ускорением их расходов.

Интегральную величину затрат денежных средств от начала полного цикла до начала эксплуатации называют обобщенным фондом [18]

$$\Phi(\tau) = \int_{\tau_0}^{\tau} P(\tau) d\tau,$$

где τ — время генерального цикла КТС; $P(\tau)$ — суммарные затраты по всем статьям расходов, включая приведенные расходы на эксплуатацию выпускаемых и ранее поступивших в эксплуатацию КТС в функции времени; τ_0 — время начала полного цикла существования КТС.

Экономическим эффектом $\Pi(\tau)$ или отдачей называют денежное выражение дохода, связанное с эксплуатацией данной серии КТС. Интеграл функции отдачи за период полного цикла

$$\Psi(\tau) = \int_{\tau_0}^{\tau} \Pi(\tau) d\tau$$

называют фондоотдачей.

Текущая прибыль выражается разностью

$$f(\tau) = \Pi(\tau) - P(\tau).$$

До некоторого момента времени τ_0 от начала полного цикла расходы превышают доходы и только при достижении равенства $\Pi(\tau) = P(\tau)$ начинается эффективная фондоотдача.

Время, в течение которого окупятся все затраты на создание КТС, называют временем самоокупаемости. Начиная с него, КТС приносит «чистую» прибыль

$$F(\tau) = \int_{\tau_0}^T [\Pi(\tau) - P(\tau)] d\tau,$$

где T — срок существования нового КТС.

Для более полного отражения экономических процессов необходимо еще учитывать потери от временного «замораживания» фондов. Вклады первого года не принесут дополнительной прибыли

$$\Delta\Phi = [(1 + K_\Phi)^n - 1] \Phi_1,$$

где K_Φ — процент прироста активно оборачивающегося фонда в течение года; n — время существования КТС; Φ_1 — фонд, «замороженный» в течение первого года.

Вклады последующих лет не принесут дополнительной прибыли

$$\Delta\Phi_i = [(1 + K_\Phi)^{n-i} - 1] \Phi_i,$$

где i — год вклада в новый КТС.

За все n лет (срок существования ОП) полные потери с учетом «замороженных» средств составят

$$\Phi = \sum_{i=1}^n [(1 + K_\Phi)^{n-i} - 1] \Phi_i + \Phi_T = \sum_{i=1}^n \Phi_i (1 + K_\Phi)^{n-i},$$

где $\Phi_T = \sum_{i=1}^n \Phi_i$.

Отдача от внедрения новой КТС начинается с момента ввода ее в эксплуатацию (τ_0). Прибыль, которую принесут возвратные средства, можно исчислять процентами для функции $f(\tau)$. В этом случае прибыль $\varphi(\tau)$ аналогично функции потерь $\Phi(\tau)$ выразится как

$$\varphi(\tau) = \int_{\tau_0}^T (1 + K_\Phi)^{(T-\tau)} f(\tau) d\tau.$$

Функция $f(\tau)$ в этом случае определена на интервале от τ_0 до T . Истинная или «чистая» прибыль теперь может быть определена как разность

$$F(\tau) = \varphi - \Phi = \int_{\tau_0}^T (1 + K_\Phi)^{(T-\tau)} f(\tau) d\tau - \int_{\tau_0}^T (1 + K_\Phi)^{(T-\tau)} P(\tau) d\tau.$$

Относительная величина прибыли по сравнению с затратами

$$q = \frac{\Phi - \Phi}{\Phi} = \frac{\int_{\tau_0}^T (1 + K_\Phi)^{(T-\tau)} f(\tau) d\tau - \int_0^T (1 + K_\Phi)^{(T-\tau)} P(\tau) d\tau}{\int_0^T (1 + K_\Phi)^{(T-\tau)} P(\tau) d\tau}. \quad (4.9)$$

Пользуясь выражением (4.9), можно путем сопоставлений определить целесообразность интенсификации вкладов в разработку новой серии КТС.

Пусть планируемые величины обобщенных фондов и времени существования КТС составляют соответственно Φ_1 и T_1 . Решим вопрос о целесообразности интенсификации вкладов для ускорения ввода в эксплуатацию нового КТС. Обозначим в этом случае обобщенные фонды Φ_2 , а время существования — T_2 . Тогда эффект от интенсификации может быть найден как отношение фактических прибылей по обоим вариантам

$$\bar{\Theta}(T) = \frac{F_2}{F_1} = \frac{\int_{\tau_{02}}^{T_2} (1 + K_\Phi)^{(T_2-\tau)} f_2(\tau) d\tau - \int_0^{T_2} (1 + K_\Phi)^{(T_2-\tau)} P_2(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{01}}^{T_1} (1 + K_\Phi)^{(T_1-\tau)} f_1(\tau) d\tau - \int_0^{T_1} (1 + K_\Phi)^{(T_1-\tau)} P_1(\tau) d\tau}.$$

Функция прибыли должна быть несколько скорректирована с учетом потерь из-за неадекватности обслуживания. Неадекватность вызывается унификацией параметров КТС, что вызывает, во-первых, несоответствие параметров требования на обслуживание параметрам КТС (неадекватность первого рода), а, во-вторых, несоответствие количества заявок для одновременного обслуживания количеству КТС, которые могут эти заявки обслуживать (неадекватность второго рода).

Если потери от неадекватностей представить функцией

$$\pi(T) = \int_{\tau_0}^T \mu(\tau) d\tau,$$

где $\mu(\tau)$ — функция изменения потерь во времени за счет неудовлетворенного спроса, то окончательно относительную эффективность вкладов можно представить в виде

$$\tilde{\Theta}(T) = \frac{\int_{\tau_{02}}^{T_2} (1 + K_\Phi)^{(T_2-\tau)} f_2(\tau) d\tau - \int_{\tau_{02}}^{T_2} (1 + K_\Phi)^{(T_2-\tau)} P_2(\tau) d\tau - \int_{\tau_{02}}^{T_2} \mu_2(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{01}}^{T_1} (1 + K_\Phi)^{(T_1-\tau)} f_1(\tau) d\tau - \int_{\tau_{01}}^{T_1} (1 + K_\Phi)^{(T_1-\tau)} P_1(\tau) d\tau - \int_{\tau_{01}}^{T_1} \mu_1(\tau) d\tau}. \quad (4.10)$$

Полагают, что исходный (первый) вариант рассчитан заранее и не подлежит изменению, т. е. знаменатель выражения (4.10) постоянен. Тогда оптимизация (максимизация) функционала $\tilde{E}$ (Т) сводится к максимизации числителя.

Управляющим воздействием здесь является параметр Т. Однако при этом нужно учитывать и сроки начала этапов полного цикла существования.

Объект проектирования при выборе его математической модели на макроуровне рассматривается состоящим из подсистем (элементов).

В литературе, изданной в последнее время по САПР [34, 38], приводится метод построения макромоделей объекта проектирования на основе эквивалентных схем, отражающих наиболее общие закономерности процессов, происходящих в подсистемах независимо от физической природы. Рассмотрим этот метод. Он предполагает прежде всего выделение подсистем. Эта неформальная операция выполняется конструктором. При этом он руководствуется следующими основными принципами.

1. Каждая выделяемая подсистема должна быть физически однородной (механической, электрической, гидравлической, тепловой и др.).

2. Состояние подсистемы описывается множеством фазовых переменных, относящихся или к переменным потока, или потенциала. Множество фазовых переменных для каждой подсистемы конечно. В этом проявляется дискретизация пространства при переходе к макроуровню.

3. Структура подсистемы представляется множеством элементов и связей между ними. Эти компоненты отражаются на графе соответственно вершинами и ребрами.

Элементы подсистемы могут быть простыми и сложными. Простые представляются на графе одним ребром, сложные — двумя и более.

Каждое ребро характеризуется двумя фазовыми переменными типа потока I_j и типа потенциала U_j (j — номер ребра). Каждый узел, связывающий ребра, характеризуется одной фазовой переменной типа потенциала φ_j (j — номер узла). Для ребра между узлами a и b

$$U_j = \varphi_a - \varphi_b.$$

4. Свойства элемента выражаются взаимозависимостью между фазовыми переменными и представляются так называемыми компонентными уравнениями. В отличие от них уравнения, отражающие связи элементов, носят название топологических.

5. Математическая модель объекта на макроуровне выражается системой компонентных и топологических уравнений. Для представления свойств элементов и их связей используются обыкновенные дифференциальные уравнения. Форма их с точностью до обозначений физических величин оказывается одинако-

вой для элементов с различной физической природой. В этом проявляется аналогия, свойственная природе. Использование этой закономерности позволяет создать инвариантную методику построения математических моделей простых и сложных элементов. Для электрических систем основными фазовыми переменными являются токи и напряжения. В качестве элементов выделяются резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, источники тока и напряжения, трансформаторы и др. Компонентные уравнения:

$$U = RI; I = C/dU/dt; U = L (dI/dt),$$

где I — ток; U — напряжение; R — сопротивление; C — емкость; L — индуктивность.

Топологические уравнения относительно узлов и контуров строятся на основе уравнений Кирхгофа. Так, по второму закону Кирхгофа для любого узла $\sum_k I_k = 0$, а для контура $\sum_i U_i = 0$.

Для механических систем с поступательным движением основными элементами являются: масса (отображение свойства инерционности), гибкость (свойство упругости), механическое сопротивление (потеря механической энергии на трение). Фазовые переменные: сила и скорость либо сила и перемещение.

Компонентные уравнения для массы и гибкости (пружина, стержень) соответственно:

$$F = d(mU)/dt, \quad P = E_{\text{ю}} (\Delta l/l),$$

где m — масса элементарного участка; F — сила; U — скорость; P — механическое напряжение, действующее в продольном направлении; $E_{\text{ю}}$ — модуль упругости (модуль Юнга); l — размер элемента в продольном направлении; Δl — изменение размера под воздействием напряжения.

Топологические уравнения отражают принцип Даламбера (аналог первого закона Кирхгофа)

$$\sum_k F_k = 0$$

и теорему о сложении скоростей

$$\sum_i U_i = 0, \quad i = \overline{1, 3},$$

где F_k — силы, действующие на тело; U_1, U_2, U_3 — соответственно абсолютная, относительная и переносная скорости.

Для механических упругих систем в качестве элементов выбирается гибкость участков сплошной среды, а фазовых переменных — силу и скорость или силу и перемещение.

Топологические уравнения отражают условие равновесия

$$\sum_k F_k = 0$$

и условие совместимости деформаций, означающие равенство нулю суммарной деформации элементов вдоль любого замкнутого контура.

Компонентные уравнения отражают относительную деформацию, например, при продольной деформации стержня

$$\Delta l/l = (1/E_y) (P_x - \nu P_y - \nu P_z),$$

где l — продольный размер элемента (вдоль оси x); Δl — изменение продольного размера; $\nu = (\Delta d/d)/(\Delta l/l)$ — коэффициент Пуассона; d — поперечный размер элемента; Δd — изменение поперечного размера; P_x, P_y, P_z — напряжения вдоль координатных осей.

Для механических вращательных систем элементами являются: моменты инерции относительно осей вращения (I), вращательная гибкость ($L_{вр}$) и вращательное сопротивление ($R_{вр}$). Фазовые переменные: вращательный момент (M) и угловая скорость (Ω). Топологические уравнения по аналогии с поступательным движением выражаются в следующем виде:

$$\sum_k M_k = 0; \quad \sum_i \Omega_i = 0.$$

Компонентные уравнения:

$$\begin{aligned} M &= I (d\Omega/dt); \\ L_{вр} (dM/dt) &= \Omega_1 - \Omega_2; \\ MR_{вр} &= \Omega_1 - \Omega_2, \end{aligned}$$

где Ω_1, Ω_2 — угловые скорости концов элементарного участка.

Для гидравлических и пневматических систем в качестве элементов выбираются участки трубопровода, распределители, ресиверы, предохранительные клапаны, дроссели и др. Фазовые переменные — расход жидкости или воздуха (g) и давление (P).

Топологические уравнения $\sum g_k = 0$ и $\sum P_i = 0$ означают, что сумма потоков в любом узле и сумма давлений вдоль любого контура равны нулю.

Компонентные уравнения прямого участка трубопровода выражаются уравнением Навье — Стокса:

$$dU/dt = -\rho^{-1} (\partial P/\partial x) - 2 (a/\rho) U,$$

где U — скорость потока; ρ — плотность; P — давление; x — координата; a — коэффициент линеаризованного вязкого трения в трубопроводе.

Заменим $\partial P/\partial x$ на P/l , где P — разность давлений на рассматриваемом участке; l — длина участка. Учитывая, что $g = \rho S U$ (S — площадь сечения трубопровода) и $\rho = \text{const}$, получим

$$dg/dt = (S/l) P - 2 (a/\rho) g$$

или

$$P = \frac{(dg/dt) + 2 (a/\rho) g}{S/l}.$$

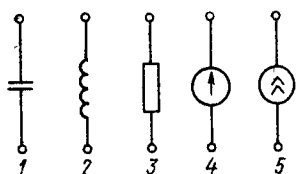


Рис. 4.10. Типы ветвей на эквивалентных схемах: 1 — емкость; 2 — индуктивность; 3 — сопротивление; 4 — источник напряжения; 5 — источник тока

Если обозначить $L_r = l/S$; $R_r = 2al/(\rho S)$; $P = L_r (dg/dt) + R_r g$, то можно увидеть, что участок трубопровода есть аналог последовательного соединения электрических элементов индуктивности и сопротивления.

Если $\rho \neq \text{const}$, то $P = L_r (dg/dt) + R_r g - lU (d\rho/dt)$.

Для круглой трубы с радиусом r

$$R_r = 8\nu l/(\pi r^4),$$

где ν — кинематическая вязкость.

В случае же турбулентного движения $P = R_r g |g|$.

Эквивалентные схемы помимо структуры отражают физическую сущность отдельных элементов. Их характерными особенностями являются:

1. Эквивалентная схема состоит из множества ветвей и узлов.
2. Каждая ветвь относится к одному из пяти возможных типов (рис. 4.10).
3. Каждой ветви соответствует компонентное уравнение.

Для первого типа

$$I = C (dU/dt),$$

где I — фазовая переменная типа тока; U — фазовая переменная типа напряжения; C — емкость.

Для второго типа

$$U = L (dI/dt),$$

где L — индуктивность.

Для третьего типа

$$U = RI,$$

где R — сопротивление.

Для четвертого типа

$$U = f_1(V, t),$$

где V — вектор фазовых переменных; t — время.

Для пятого типа

$$I = f_2(V, t).$$

4. Каждому узлу соответствует значение фазовой переменной типа потенциала, а каждой ветви — значение фазовых переменных I и U . В табл. 4.9 приведены фазовые переменные типа I и U применительно к системам с различной физической природой.

Рассмотрим построение эквивалентной схемы на простом примере.

На рис. 4.11 представлена кинематическая поступательная пара, состоящая из двух тел. На систему действуют следующие силы: P — движущая; F — трения, G — тяжести, $P_{\text{и}}$ — инерции.

Движение тела 1 относительно оси Ox происходит под действием сил P , $P_{\text{и}}$, F . Граф системы изображен на рис. 4.11, б,

**Фазовые переменные в системах
с различной физической природой**

Система	Фазовые переменные	
	типа <i>I</i>	типа <i>U</i>
Электрическая	Ток	Напряжение
Механическая поступательная	Сила	Скорость
» упругая	Вращательный момент	Деформация
» вращательная	Поток (расход)	Угловая скорость
Гидравлическая и пневматическая	Тепловой поток	Давление
Тепловая		Температура

где узлы 1 и 2 представляют взаимодействующие тела, а ребра — силы. На эквивалентной схеме рис. 4.11, *в* каждое ребро графа представлено ветвью, тип которой раскрывает физическую сущность действующих сил. Так, внешняя сила P , приложенная к телу 1, представлена на эквивалентной схеме ветвью источника потока, сила трения — сопротивлением, а сила инерции — емкостью.

Если объект проектирования состоит из подсистем с различной физической природой, то эквивалентные схемы строятся для каждой из них. Если же при этом какой-либо элемент связан с преобразованием энергии, то он используется более чем в одной эквивалентной схеме.

Взаимовлияние подсистем может быть отражено представлением внешних параметров одной подсистемы в виде функции фазовых переменных другой подсистемы.

Для примера построим эквивалентную схему дискофрезерной машины (рис. 4.12). Для упрощения систему считаем состоящей из трех тел: трактор A ; фреза B и грунт. Число степеней свободы системы равно трем. Первая — горизонтальное перемещение, вторая — вертикальное перемещение, третья — вращательное перемещение фрезы. Вертикальное перемещение происходит за счет деформации движителей и подвески. Должны быть составлены три эквивалентные схемы в соответствии со степенями свободы.

Для горизонтального перемещения необходимо учитывать

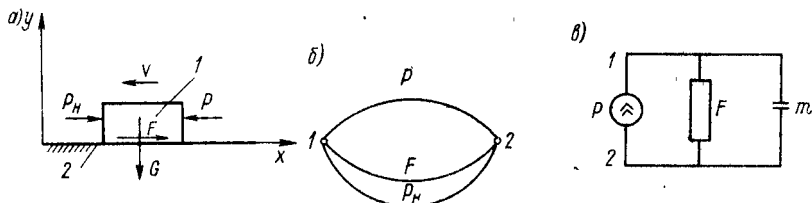


Рис. 4.11. Эквивалентная схема поступательной пары: *а* — кинематическая схема; *б* — граф пары; *в* — эквивалентная схема

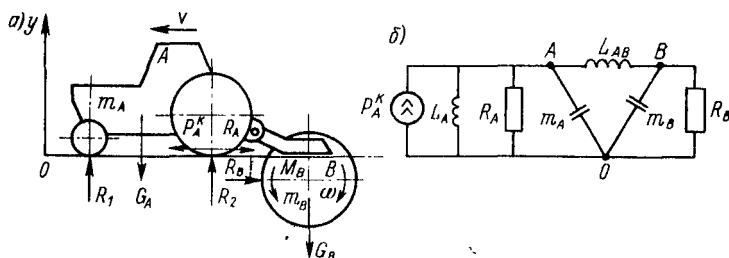


Рис. 4.12. Эквивалентная схема дискофрезерной машины: а — структурная; б — эквивалентная

массы трактора m_A и фрезы m_B , сопротивление горизонтальному перемещению фрезы в грунте R_B , сопротивление движению трактора R_A , жесткость связи трактора с фрезой L_{AB} , жесткость движителей и подвески трактора L_A . Источником горизонтального движения является окружное усилие на колесе R_A^k .

4.7. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Имитационное моделирование как один из методов анализа систем применяется в тех случаях, когда сложно или просто невозможно использовать другие виды анализа и нужно проследить за ходом протекающих процессов, а постановка эксперимента на физической модели по каким-либо причинам невозможна. Для имитационного моделирования необходимо: определить изучаемую систему, установив ее границы, переменные и константы, показатели эффективности, подобрать подходящую модель, описать модель на языке, приемлемом для ЭВМ, спланировать эксперимент и провести его, убедившись по первым пробным результатам в адекватности отображения действительных процессов в имитационной модели, обработать результаты экспериментальных данных.

Машины как объекты проектирования и обслуживания традиционно разбиваются на отдельные агрегаты, каждый из которых может рассматриваться как подсистема. Каждая такая подсистема, в свою очередь, может быть разбита на конечное число узлов, т. е. более мелких подсистем. Дальнейшее разбиение приведет к выделению таких частей, расчленение которых не имеет смысла по условиям поставленной задачи.

Для изучения поведения сложной системы широко используется имитационное моделирование. Ему посвящены многие издания. Уже созданы и пакеты прикладных программ, реализующих этот метод анализа. Воспользуемся работой [9] и рассмотрим основы постановки задачи и методов ее решения.

Для того, чтобы задать сложную систему, необходимо представить описание всех ее элементов и описание взаимодействия между элементами. Внешняя среда, воздействующая на систему, также рассматривается состоящей из элементов, причем учитываются только те из них, которые связаны с системой.

Под динамической системой (в широком смысле) понимается объект, находящийся в каждый момент времени t (из множества T) в одном из возможных состояний z_t (из множества Z) и способный переходить (во времени) из одного состояния в другое под действием внешних и внутренних причин (совершая при этом движение $z(t)$).

Воздействие внешней среды на систему принято называть входными сигналами. Входной сигнал x_t характеризуется координатами $x_1, x_2, \dots, x_n$ и является элементом множества входных сигналов X .

Воздействие системы на внешнюю среду называют выходными сигналами (y_t). Они тоже характеризуются координатами $y_1, y_2, \dots, y_r$.

Динамическая система содержит следующие основные механизмы: 1) изменения состояния под действием внутренних причин (без вмешательства внешней среды); 2) приема входного сигнала и изменения состояния под действием этого сигнала; 3) формирования выходного сигнала (как реакции динамической системы на внутренние и внешние причины изменения состояний).

Рассматривают операторы переходов $H: T \times Z \times X \rightarrow Z$ и выходов $G: T \times Z \times X \rightarrow Y$.

Динамические системы, подвергаемые случайному воздействию, описываются с помощью теории случайных процессов. Наиболее часто используются случайные процессы с дискретным вмешательством случая. В рамках такого подхода поведение системы можно описать следующим образом. В некоторый момент времени t_0 система находится в состоянии z^0 в замкнутой области состояний Z , называемой пространством состояний. Совершая движение $z(t)$, точка движется к границе области и в момент времени t^* достигает ее. Состояние системы на границе обозначено z^* .

На участке $t_0 \leq t \leq t^*$ и при состояниях, соответствующих заданной области, движения системы задают упорядоченными парами (t, z_t) . Зависимость z_t от t может задаваться по-разному, в частности, с помощью дифференциальных уравнений. Момент t^* относится к опорным моментам времени. В этот момент состояние системы скачкообразно возвращается внутрь области Z в некоторую точку z' . Положение точки z' зависит от распределения вероятностей на множестве точек пространства Z

$$z_{t^*+0} = z'(t^*, z^*). \quad (4.11)$$

Под $t^* + 0$ понимается момент времени, весьма близкий к t^* .

В момент t^* система выдает выходной сигнал

$$y_{t^*} = G^*(t^*, z^*), \quad (4.12)$$

где G^* — заданная функция (может быть случайной).

С момента времени $t^* + 0$ система вновь начинает совершать движение к границе. В некоторый момент времени $\hat{t}$, когда система находится в состоянии $\hat{z}$, поступает входной сигнал $\hat{x}$. Система изменяет свое состояние в виде скачка в новое состояние внутри пространства Z в точку z'' . Положение точки z'' зависит от распределения вероятностей на множестве точек пространства

$$z_{t+0} = z''(\hat{t}, \hat{z}, \hat{x}). \quad (4.13)$$

Момент времени $\hat{t}$ также относится к опорным. В этот же момент выдается выходной сигнал

$$y_{\hat{t}} = \hat{G}(\hat{t}, \hat{z}, \hat{x}). \quad (4.14)$$

Из точки $\hat{z}$ система совершает новое перемещение, новые скачки на границе пространства или в случае поступления входных сигналов.

Для задания системы с дискретным вмешательством случая необходимо указать: 1) уравнение границы области Z ; 2) уравнения движения точки z внутри области Z ; 3) распределение вероятностей скачка состояния при выходе на границу объекта; 4) соотношение для расчета координат выходных сигналов; 5) распределение вероятностей скачка состояния при поступлении входного сигнала.

Все эти уравнения и соотношения называют характеристиками общей динамической системы с дискретным вмешательством случая.

Частными случаями характеристик могут быть следующие.

Динамическая система находится в непрерывном движении, причем функция $z(t)$ нужное число раз дифференцируема, а скачки при этом нулевые (координаты точки не меняются). Система в таком случае описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Динамическая система не совершает движения, а находится в постоянном состоянии до момента поступления входного сигнала. Переход состояний системы происходит скачками. Такие системы описываются вероятностными автоматами. Если же система может находиться всего в двух состояниях (условно обозначаемых 1 и 0), то она описывается конечным автоматом.

Фиксированные типы характеристик называются параметрами системы. Кроме параметров необходимо задать начальное состояние z_0 в момент t_0 и поток входных сигналов (моменты $\hat{t}$ поступления и значения $\hat{x}$ сигналов).

Динамические системы с дискретным вмешательством случая распространяются на широкий класс задач. Даже тогда, когда входной сигнал распределен по времени, его можно считать поступаю-

щим через определенный интервал, а изменение координат сигнала $x(t)$ представить ступенчатой функцией. Если для решения задачи важна гладкость функции $x(t)$, то механизм приема сигнала можно снабдить алгоритмом сглаживания. Чаще всего функцию $x(t)$ представляют в виде интерполяционного полинома.

Элементы системы взаимодействуют друг с другом и с элементами внешней среды. Задать взаимодействие — значит указать модели: 1) формирования выходного сигнала элемента c_j ; 2) сопряжения элементов сетью каналов связи; 3) трансформации сигнала в процессе прохождения через реальный канал связи; 4) приема входного сигнала и поведения элемента C_k под воздействием этого сигнала.

Первая модель в общем виде представлена выражением (4.12). Вторая модель рассматривает каналы связи как идеальные и указывает лишь адреса, по которым поступают сигналы из внешней среды или выходные сигналы элементов системы. Для представления третьей модели реальные каналы связи рассматриваются как самостоятельные динамические системы с элементами, вызывающими перекодирование, селекцию, запаздывание, искажение, сбои, поломки и т. д. Четвертая модель описывается в общем виде выражением (4.13).

Для составления модели сопряжения элементов любой сигнал, поступающий из внешней среды или от какого-либо элемента системы, описывается множеством характеристик

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (4.15)$$

Подобно этому и каждый выходной сигнал можно представить в виде

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_r\}. \quad (4.16)$$

В выражениях (4.15) и (4.16) $x_i \in \dot{X}_i$ и $y_l \in \dot{Y}_l$, где $\dot{X}_i$ и $\dot{Y}_l$ — заданные множества значений каждой характеристики. В связи с этим каждый входной сигнал может быть представлен совокупностью элементарных сигналов, одновременно возникающих на входе элемента системы. Подобно этому и каждый выходной сигнал представляется совокупностью элементарных выходных сигналов. Каждый элемент системы содержит набор входных и выходных контактов. Каждый из контактов предназначен для приема или выдачи элементарного сигнала. Набор входных контактов обозначается $[X_i^{(j)}]_1^n$, а выходных $[Y_l^{(j)}]_1^r$. В обозначениях наборов индексы i и l означают номер элементарного сигнала; j — номер элемента; n и r — соответственно числа, означающие количество элементарных входных и выходных сигналов; X и Y — множества значений каждого элементарного сигнала. Значения n и r для различных элементов системы — различны, поэтому для каждого из них нужно принимать $n = n_j$ и $r = r_j$.

Предполагается, что элементарные сигналы передаются в сложной системе независимо друг от друга по элементарным каналам,

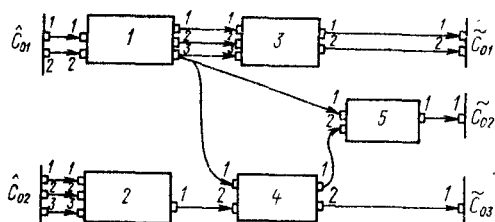


Рис. 4.13. Схема одноуровневой сложной системы

соединяющим выходной и входной контакты. К каждому входному контакту подсоединяется не более одного канала. К выходному контакту может быть присоединено и несколько каналов, направляемых к различным элементам сложной системы. Каждый сигнал, выдаваемый

во внешнюю среду, складывается из элементарных сигналов на выходе одного или нескольких каналов.

Располагая множествами $[X_i^{(j)}]_N$ и $[Y_i^{(j)}]_N$, можно ввести однозначный оператор R отображения $[X_i^{(j)}]_N \rightarrow [Y_i^{(j)}]_N$ так, что каждому входному контакту ставится в соответствие один выходной контакт, связанный с ним элементарным каналом.

На рис. 4.13 приведен пример одноуровневой сложной системы с контактами и каналами связи. На схеме обозначены 1, 2, 3, 4, 5 — элементы системы; $\hat{C}_{01}$, $\hat{C}_{02}$ — элементы внешней среды (источники сигналов); $\hat{C}_{01}$, $\hat{C}_{02}$, $\hat{C}_{03}$ — элементы внешней среды (потребители сигналов).

Элемент 1 обладает двумя входными и тремя выходными контактами, у элемента 2 три входных и один выходной контакт, у элемента 3 — три входных и два выходных, у элемента 4 — два входных и выходных, у элемента 5 — два входных и один выходной контакт.

Совокупность множеств $[X_i^{(j)}]_N^1$ и $[Y_i^{(j)}]_N^1$ вместе с оператором R называется схемой сопряжения в канонической форме элементов в системе, а оператор R — оператором сопряжения.

Оператор сопряжения представляется в табличной форме двух видов.

Первая форма (табл. 4.10) включает столбцы, соответствующие номерам элементов системы и внешней среды. Строки таблицы соответствуют номерам входных контактов элементов системы. Сигнал из внешней среды рассматривается состоящим из элементарных каналов, воспринимаемых одним или несколькими элементами системы.

Таблица 4.10
Первая форма оператора сопряжения

Номер входного контакта	Номер элемента системы и внешней среды							
	1	2	3	4	5	01	02	03
1	01,1	02,1	1,1	1,3	1,3	3,1	5,1	4,2
2	01,2	02,2	1,2	2,1	4,1	3,2	—	—
3	—	02,3	1,3	—	—	—	—	—

Математическая модель любого элемента сложной системы в рамках принятых условий сопряжения выражается парой $[X_i^{(j)}]_1^n$ и $[Y_i^{(j)}]_1^n$, каждый входной контакт обозначен $X_i^{(j)}$, а выходной $Y_i^{(j)}$.

Множество всех входных контактов сложной системы, состоящей из N элементов, выражается:

$$[X_i^{(j)}]_N = \bigcup_{j=1}^N [X_i^{(j)}]_1^n,$$

а множество выходных контактов

$$[Y_i^{(j)}]_N = \bigcup_{j=1}^N [Y_i^{(j)}]_1^n.$$

Внешняя среда описывается множеством входных и выходных контактов $[X_i^{(0j)}]_1^n$, $[Y_i^{(0j)}]_1^n$.

Теперь множество всех входных контактов, включая и контакты внешней среды

$$[X_i^{(j)}]_N = \left\{ \bigcup_{j=1}^N [X_i^{(j)}]_1^n \right\} \cup \left\{ \left[\bigcup_{j=1}^{k^*} [X_i^{(0j)}]_1^n \right] \right\},$$

а множество всех выходных контактов

$$[Y_i^{(j)}]_N = \left\{ \bigcup_{j=1}^N [Y_i^{(j)}]_1^n \right\} \cup \left\{ \bigcup_{k=1}^{k^*} [Y_i^{(0k)}]_1^n \right\}.$$

В ячейках таблицы проставляются номера элементов и номера их выходных контактов, с которыми связаны входные контакты.

Вторая форма таблицы (табл. 4.11) содержит столбцы, соответствующие входным контактам, и строки — выходным контактам.

Одноуровневой схемой сопряжения называется такая, в которой элементы входят непосредственно в систему и не распределены по подсистемам. Если некоторые элементы объединить в подсистемы, то получится многоуровневая схема сопряжения. Пусть применительно к рис. 4.14 элементы 1 и 3 соединены в подсистему

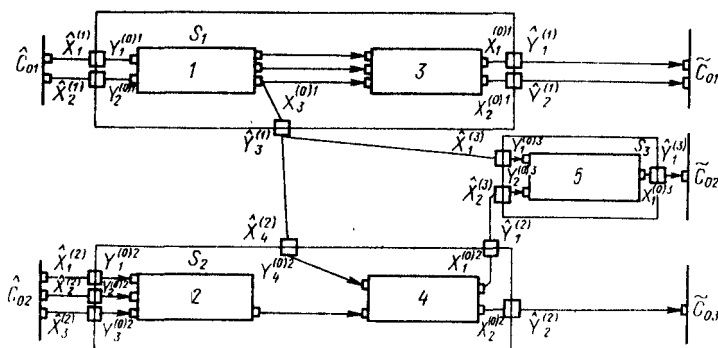


Рис. 4.14. Схема многоуровневой сложной системы

Таблица 4.11

Вторая форма оператора сопряжения

Выход- ной кон- такт	Входной контакт															
	1,1	1,2	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3	4,1	4,2	5,1	5,2	01,1	01,2	02,1	03,1
01,1	1															
01,2		1														
02,1			1													
02,2				1												
02,3					1											
1,1						1										
1,2							1									
1,3								1								
2,1										1						
3,1													1			
3,2														1		
4,1												1				
4,2																1
5,1															1	

S_1 , элементы 2 и 4 — в подсистему S_2 , элемент 5 включен в подсистему S_2 . Каждая подсистема будет рассматриваться с двух точек зрения: 1) как самостоятельная система; 2) как элемент сложной системы. На пересечении границы подсистемы с каналами связи вводятся в рассмотрение фиктивные контакты. Они считаются входными и выходными для всей подсистемы. Так, для подсистемы S_1 входными контактами будут $\hat{X}_1^{(1)}$ и $\hat{X}_2^{(1)}$, а выходными $\hat{Y}_1^{(1)}$, $\hat{Y}_2^{(1)}$, $\hat{Y}_3^{(1)}$. Эти же контакты внутри подсистемы являются соответственно выходными и входными для внешней среды.

Таким образом, наборы контактов $[\hat{X}_i^\mu]$ и $[\hat{Y}_i^\mu]$ обеспечивают взаимосвязь подсистемы S_μ с внешней средой, а наборы контактов $[X_i^{(0)\mu}]$ и $[Y_i^{(0)\mu}]$ — взаимосвязь элементов внутри подсистемы. Каждый фиктивный контакт характеризуется парой $(\hat{X}_i^{(\mu)}; Y_i^{(0)\mu})$ или $(X_i^{(0)\mu}; \hat{Y}_i^\mu)$.

Параметры динамических систем могут принадлежать множествам любой природы в зависимости от класса систем. Параметры элементов системы могут изменяться во времени. Переменной может быть и структура. Под переменной структурой системы понимается изменение схемы сопряжения ее элементов, а изменение схемы сопряжения связано с изменением наборов $[X_i^{(\mu)}]_1^n$ и $[Y_i^{(\mu)}]_1^n$, и оператора R на всех уровнях иерархии.

Таким образом, оператор R можно представить зависящим от времени

$$Y_i^{(k)} = R(X_i^{(j)}, t)$$

и от значений параметров

$$Y_i^{(k)} = R(X_i^{(j)}, t, \alpha),$$

где $t \in T$, $\alpha \in A$, T — множество моментов времени; A — множество значений параметра α .

Даже если R меняется непрерывно, все равно систему можно рассматривать с кусочно-постоянным оператором и скачкообразным переходом к новой схеме сопряжения. На отдельных интервалах времени один и тот же объект описывается различными сложными системами.

Если параметр α конструктивный, то решается задача синтеза оптимальной структуры; если же α параметр управления, то решается задача оптимального управления, в результате чего находятся оптимальные значения $\alpha(t)$, обеспечивающие близость процесса функционирования сложной системы к заданному; α может рассматриваться как элементарное событие из множества A с заданным на нем распределением вероятностей $P(B)$, где B — подмножество множества A . Тогда сложная система будет иметь стохастическую структуру (связи между элементами носят случайный характер).

Существует и другая форма схемы сопряжения, носящая название натуральной. В ней элементарным понятием является штекер — совокупность контактов элемента C_j , связанных элементарными каналами с контактами элемента C_h . Входные штекеры элемента C_j обозначаются $\xi_p^{(j)}$, а выходные штекеры элемента C_h — $\eta_q^{(k)}$. Число входных штекеров элемента C_j равно числу элементов внешней среды и системы, с которыми связан элемент C_j и по отношению к которым он потребитель. Входные штекеры элемента не могут содержать один и тот же контакт. Все контакты входят в штекер только один раз.

Число выходных штекеров элемента равно числу элементов внешней среды и системы, являющихся потребителями сигналов данного элемента. В разные выходные штекеры элемента могут входить одни и те же контакты. Таким образом, каждый элемент системы характеризуется наборами $[\xi_p^{(j)}]$ и $[\eta_q^{(j)}]$.

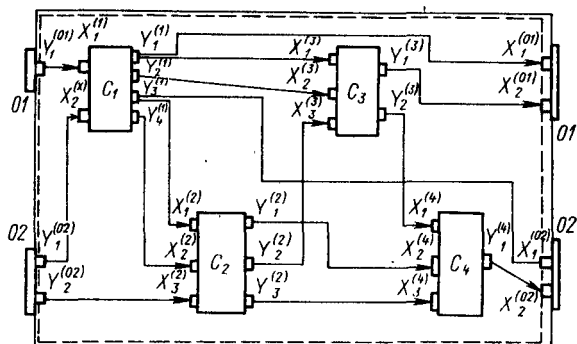


Рис. 4.15. Схема одноуровневой сложной системы с натуральным сопряжением элементов

Вводится в рассмотрение оператор $\eta_q^{(k)} = \rho(\xi_p^{(j)})$, с помощью которого ставится в соответствие каждому входному штекеру $\xi_p^{(j)}$ единственный выходной штекер $\eta_q^{(k)}$. Совокупность наборов $[\xi_p^{(j)}]$ и $[\eta_q^{(k)}]$ вместе с оператором ρ называют одноуровневой схемой сопряжения элементов C_j системы S в натуральной форме.

Оператор ρ может быть представлен таблицей, столбцы которой означают элементы системы и внешней среды

$$j = 01, 02, \dots, 0k^*, 1, 2, \dots, N, 01, 02, \dots, 0j^*,$$

где $01, 02, \dots, 0k^*$ — норма внешних источников; $1, 2, \dots, N$ — номера элементов; $01, 02, \dots, 0j^*$ — номера внешних потребителей.

В строках таблицы, соответствующих номерам штекеров, отражаются p и q , причем в ячейках таблицы делаются две записи: верхняя и нижняя. Верхняя соответствует входным штекерам, а нижняя — выходным.

Рассмотрим для примера одноуровневую систему со схемой соединений, представленной на рис. 4.15.

Элемент C_1 имеет входные штекера $\xi_1^{(1)} = \{X_1^{(1)}\}$ и $\xi_2^{(1)} = \{X_2^{(1)}\}$ и выходные $\eta_1^{(1)} = \{Y_3^{(1)}, Y_4^{(1)}\}$, $\eta_2^{(1)} = \{Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)}\}$; $\eta_3^{(1)} = \{Y_1^{(1)}\}$, $\eta_4^{(1)} = \{Y_3^{(1)}\}$.

Элемент C_2 имеет входные штекера $\xi_1^{(2)} = \{X_1^{(2)}, X_2^{(2)}\}$, $\xi_2^{(2)} = \{X_3^{(2)}\}$ и выходные $\eta_1^{(2)} = \{Y_1^{(2)}, Y_3^{(2)}\}$, $\eta_2^{(2)} = \{Y_2^{(2)}\}$.

Элемент C_3 содержит два входных штекера $\xi_1^{(3)} = \{X_1^{(3)}, X_2^{(3)}\}$, $\xi_2^{(3)} = \{X_3^{(3)}\}$ и два выходных $\eta_1^{(3)} = \{Y_1^{(3)}\}$, $\eta_2^{(3)} = \{Y_2^{(3)}\}$.

Элемент C_4 — два входных $\xi_1^{(4)} = \{X_1^{(4)}\}$, $\xi_2^{(4)} = \{X_2^{(4)} X_3^{(4)}\}$ и один выходной штекер $\eta_1^{(4)} = \{Y_1^{(4)}\}$.

Для описания элементов сложных систем в зависимости от решаемой задачи прибегают к обыкновенным дифференциальным

уравнениям, конечным автоматам, вероятностным автоматам, к системе массового обслуживания.

Конечные автоматы удобны для описания любых детерминированных систем (не учитывающих случайные факторы), функционирующих в дискретном времени. Обыкновенные дифференциальные уравнения можно применить к детерминированным системам с непрерывным временем. Вероятностные автоматы дают возможность описать элементы стохастических систем с дискретным временем. Системы массового обслуживания удобны для представления стохастических систем с непрерывным временем.

Перечисленные математические схемы не охватывают все возможные постановки задач, тем не менее круг их применения весьма широк.

Конечным автоматом может считаться объект, который функционирует в моменты автоматного времени $t_0 < t_1 < t_2 \dots$. В каждый из этих моментов объект находится в одном из возможных состояний $z(t_i) \in Z$. При этом Z — конечное множество состояний объекта. В каждый момент времени на вход автомата поступает входной сигнал $x(t) \in X$, где X — конечное множество их возможных сигналов. Объект под воздействием входного сигнала переходит в новое состояние в соответствии с одношаговой функцией

$$z(t) = \varphi [z(t-1), x(t)],$$

где под $z(t-1)$ понимается состояние автомата в момент времени, предшествующий поступлению входного сигнала.

Кроме того, объект выдает выходной сигнал $y(t)$, принадлежащий конечному множеству выходных сигналов, в соответствии с функцией выходов

$$y(t) = \psi [z(t-1), x(t)].$$

Функции переходов и выходов удобно представлять в виде таблицы. Так, в табл. 4.12 представлен объект, который может находиться в четырех состояниях (z_1, z_2, z_3, z_4) и воспринимать три входных сигнала (x_1, x_2, x_3). В ячейках таблицы указаны новые состояния, в которые приходит объект из состояния, соответствующего столбцу, получив входной сигнал, соответствующий строке.

Так, если объект находится к моменту поступления входного сигнала x_1 в состоянии z_3 , то его новое состояние соответствует z_1 .

Таблица выходных сигналов имеет тот же вид, только в ее ячейках указываются выходные сигналы из множества их значений.

В табл. 4.13 представлена функция выходов объекта, выходные сигналы которого ограничены множеством из двух значений $\{y_1, y_2\}$.

Если объект, находящийся в состоянии z_3 , получит входной сигнал x_3 , то на выходе появится сигнал y_1 .

Таблица 4.12

Функция переходов

Выход- ной сигнал	Состояние системы			
	z_1	z_2	z_3	z_4
x_1	z_2	z_3	z_1	z_2
x_2	z_1	z_1	z_2	z_3
x_3	z_4	z_1	z_2	z_3

Таблица 4.13

Функция выходов

Входной сигнал	Состояние системы			
	z_1	z_2	z_3	z_4
x_1	y_1	y_2	y_1	y_2
x_2	y_1	y_1	y_2	y_2
x_3	y_1	y_1	y_1	y_2

Объект считается синхронным автоматом, если моменты времени поступления входных сигналов, изменение состояния и выдачи выходных сигналов заранее определены. Если же входные сигналы могут поступать в любые моменты времени на заданном интервале, тот объект относят к асинхронным автоматам.

Иногда для определения функции перехода недостаточно знать в каком состоянии находится объект к моменту поступления входного сигнала. На нее влияет и то, в каком состоянии он находится в другие предшествующие моменты времени. Пусть k означает порядок начального множества состояний, а набор $\{z(t-k), z(t-k+1), z(t-1)\}$ характеризует предысторию объекта. Тогда функция перехода связывает пару $\{z(t-k), z(t-k+1), \dots, z(t-1)\}, x(t)\}$.

Подобного рода объекты считают конечными автоматами с последствием и представляют при помощи некоторого присоединенного автомата, состояние которого характеризуется предысторией объекта.

Конечными автоматами чаще всего представляют объекты, функции переходов и выходов которых не зависят явно от времени. Такие автоматы можно называть стационарными. Однако при необходимости возможно представить эти функции и зависящими от времени. В этом случае говорят о нестационарных конечных автоматах. Так могут быть описаны объекты с изменяющейся внешней средой, с изменением состояния за счет старения и др. Реальные объекты ближе к нестационарным автоматам, чем к стационарным. Однако в настоящее время стремятся уйти от рассмотрения нестационарного автомата путем перехода к некоторому эквивалентному стационарному.

К обыкновенным дифференциальным уравнениям прибегают, как уже отмечалось, при описании элементов детерминированной динамической системы с непрерывным временем.

Если рассматривать элемент как материальную точку в пространстве состояний, а ее перемещение вдоль некоторых осей ξ_1 ,

ξ_2, ξ_3 , то движение элемента может быть выражено системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \xi_1}{dt^2} = f_1(t, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \dot{\xi}_1, \dot{\xi}_2, \dot{\xi}_3); \\ \frac{d^2 \xi_2}{dt^2} = f_2(t, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \dot{\xi}_1, \dot{\xi}_2, \dot{\xi}_3); \\ \frac{d^2 \xi_3}{dt^2} = f_3(t, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \dot{\xi}_1, \dot{\xi}_2, \dot{\xi}_3). \end{cases}$$

Пространство, в котором происходит движение точек, составляющих систему, называют ее конфигурационным пространством. Размерность этого пространства равна числу степеней свободы системы.

Динамические системы с непрерывным временем характеризуют некоторым пространством их состояний. Пусть для примера система представлена материальной точкой, уравнение движения которой имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + \omega^2 \xi = 0,$$

где ξ — перемещение точки вдоль оси; ω — некоторый параметр.

Решение уравнения найдем, понизив его порядок. Для этого введем следующие обозначения:

$$\xi = z_1; \quad \frac{d\xi}{dt} = z_2.$$

Тогда получим систему уравнений

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2; \quad \frac{dz_2}{dt} = -\omega^2 z_1,$$

решая которую при начальных условиях $t = 0$, $z_1 = \xi_0$, $z_2 = \dot{\xi}_0$ получим

$$z_1(t) = \xi_0 \cos \omega t + \frac{\dot{\xi}_0}{\omega} \sin \omega t;$$

$$z_2(t) = -\xi_0 \omega \sin \omega t + \dot{\xi}_0 \cos \omega t.$$

Полученная пара значений (z_1, z_2) определяет в рассматриваемом примере перемещение и скорость материальной точки к моменту времени t от некоторого начального состояния при $t = 0$. Эта пара может рассматриваться характеристикой состояния системы. Область, содержащая все возможные для данной системы точки с координатами z_1 и z_2 , называют пространством состояний. Для случая движения системы, состоящей из n точек в трехмерном пространстве с $3n$ степенями свободы, вектор, определяющий пространство состояний, будет иметь $6n$ координат.

Событием или фазой процесса движения системы называют упорядоченную пару (t, z) , где z — вектор, определяющий пространство состояний.

Через каждую точку пространства состояний проходит единственная траектория динамической системы. Точки состояния

системы, лежащие на одной траектории, принадлежат одному классу. Таким образом, траектории динамической системы создают ее портрет в пространстве состояний (фазовый портрет).

Дифференциальные уравнения, описывающие динамическую систему, отражают процесс ее перехода из одного состояния в другое. Внешнее воздействие, выражаемое некоторой функцией $x(t)$, входящей в правую часть дифференциальных уравнений, называют входным процессом. Мгновенное значение $x(t)$ при $t = t'$ считают входным сигналом.

С учетом введенных обозначений дифференциальные уравнения могут быть представлены в самом общем виде:

$$\frac{dz}{dt} = f(t, z, x(t)).$$

При начальных условиях $t = t_0$, $z = z^0$ общее решение имеет вид

$$z(t) = z^0 + \int_{t_0}^t f(\tau, z(\tau), x(\tau)) d\tau.$$

Выходные сигналы по аналогии с входными можно представить мгновенным значением функции

$$y(t) = g(t, z, x(t)).$$

Входные и выходные сигналы в общем виде представляют вектор с координатами:

$$x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

$$y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t)).$$

Теперь можно дать полное описание динамической системы. Оно должно включать:

1) дифференциальные уравнения движения в пространстве состояний

$$\frac{dz_1}{dt} = f_1(t, z_1, z_2, \dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

$$\frac{dz_2}{dt} = f_2(t, z_1, z_2, \dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

$$\frac{dz_n}{dt} = f_n(t, z_1, z_2, \dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

2) входные сигналы в каждый момент времени на полупространстве $(t_0, t]$

$$(x(t))_{t_0}^t;$$

3) выходные сигналы

$$y_1(t) = g_1(t, z_1, z_2, \dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

$$y_2(t) = g_2(t, z_1, z_2, \dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

$$\dots \dots \dots$$

$$y_r(t) = g_r(t, z_1, z_2, \dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

4) начальные условия

$$t = t_0, z_1 = z_1^0, z_2 = z_2^0, \dots, z_n = z_n^0.$$

Если выполнено условие существования и единственности решений, то они имеют вид:

$$z_1(t) = \varphi_1(t, t_0, z_1^0, z_2^0, \dots, z_n^0, (x(t))_{t_0}^t);$$

$$z_2(t) = \varphi_2(t, t_0, z_1^0, z_2^0, \dots, z_n^0, (x(t))_{t_0}^t);$$

$$\dots \dots \dots$$

$$z_n(t) = \varphi_n(t, t_0, z_1^0, z_2^0, \dots, z_n^0, (x(t))_{t_0}^t).$$

Решение системы дифференциальных уравнений, соответствующее траектории, проходящей в момент t_0 через точку

$$z^0 = (z_1^0, z_2^0, \dots, z_n^0),$$

обозначают для краткости

$$z(t) = F(t, t_0, z^0, (x(t))_{t_0}^t)$$

и считают функцией переходов.

По аналогии выражение

$$y(t) = G(t, t_0, z^0, (x(t))_{t_0}^t)$$

называют функцией выходов динамической системы.

Для интегрирования системы дифференциальных уравнений чаще всего прибегают к конечно-разностным схемам. В этом случае решается система:

$$z_1(t+h) = z_1(t) + hf_1(t_1, z_1, z_2, \dots$$

$$\dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

$$z_2(t+h) = z_2(t) + hf_2(t_1, z_1, z_2, \dots$$

$$\dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t));$$

$$\dots \dots \dots$$

$$z_n(t+h) = z_n(t) + hf_n(t_1, z_1, z_2, \dots, z_n, x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)),$$

где h — шаг интегрирования.

В таком виде функция перехода похожа на функцию перехода нестационарного конечного автомата.

Вернемся вновь к рассмотрению объектов, процессы в которых происходят в дискретном времени с той лишь разницей, что функция переходов — случайна. Случайными могут быть и функции выходов, и начальное состояние. Подобного рода объекты описываются вероятностными автоматами. Они определяются множеством состояний, множеством входных и множеством выходных сигналов, а также множеством матриц размерностью $n \times n$, элементы которых определяют вероятность того, что находясь в состоянии z_i и получив входной сигнал x_r , автомат перейдет в состояние z_j , а выходной сигнал будет y_p . При анализе объекта проектиро-

вания на метауровне его можно представить входящим в некоторую систему массового обслуживания как средство для удовлетворения определенных заявок. Математическое описание в этом случае включает модель потока заявок и модель процесса функционирования совокупности обслуживающих средств (каналов).

Заявки в системе массового обслуживания могут быть однородными и неоднородными. В первом случае они характеризуются единственным набором параметров обслуживания и для построения модели потока заявок важен лишь факт поступления или непоступления заявки в данный момент времени.

У неоднородных заявок параметры различны и модель должна отражать вектор с координатами $t_j, \alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{mj}$, где $\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{mj}$ — набор параметров заявки, поступающей в t_j момент времени.

В моделях используют не сами моменты времени, а интервалы ξ_j между последовательными заявками. В общем случае эти интервалы случайны и описываются совместной функцией распределения

$$F(z_1, z_2, \dots, z_k) = P(\xi_1 < z_1, \xi_2 < z_2, \dots, \xi_k < z_k).$$

Если каждый интервал (ξ_i) имеет одинаковую плотность распределения $f_j(z_j)$, то поток называют рекуррентным. Для него среднее значение длины интервала между последовательными заявками, как математическое ожидание случайной величины ξ , определяется выражением

$$m = \int_0^{\infty} z f(z) dz.$$

Величина, обратная m , обозначается λ , т. е. $\lambda = 1/m$ и называется интенсивностью потока. Поток, у которого вероятность поступления k заявок на интервале времени $(t_0, t_0 + t)$ не зависит от t_0 , а лишь от t и k , называют стационарным. Если к тому же вероятность появления двух и более заявок на интервале времени $(t_0, t_0 + t)$ при $t \rightarrow 0$ стремится к нулю, то поток называется ординарным; если случайные величины ξ_j независимы, то совместную функцию плотности можно представить произведением плотностей распределения каждого интервала

$$f(z_1, z_2, \dots, z_k) = f_1(z_1) f_2(z_2) \times \dots \times f_k(z_k).$$

Поток с таким свойством называется потоком с ограниченным последствием. Если при этом внутри самого интервала поступление заявки не зависит от времени, прошедшего с момента поступления предыдущей заявки, то поток называется без последствий.

Стационарный однородный поток без последствия носит название простейшего или пуассоновского. Вероятность поступления k заявок за время t для такого потока выражается функцией распределения (закон распределения Пуассона):

$$P_k(t) = e^{-\lambda t} (\lambda t)^k / k!.$$

Функция плотности интервалов между заявками имеет вид

$$f(z) = \lambda e^{-\lambda z}.$$

Рассмотрим моделирование процесса обслуживания. Пусть число каналов обслуживания равно n . Обычно считают, что каналы работают одновременно и независимо друг от друга. Канал может находиться в двух состояниях: занят, свободен. Заявки, поступившие в систему массового обслуживания, либо попадают в канал и обслуживаются, либо ожидают своей очереди. Обычно время пребывания в очереди ограничивают некоторой величиной γ . Если за это время заявка не попадает на обслуживание, то она отклоняется. В зависимости от величины γ различают системы массового обслуживания: с отказами ($\gamma = 0$), с ожиданием ($\gamma = \infty$) и смешанные ($0 < \gamma < \infty$). Канал характеризуется временем занятости η , чаще всего рассматриваемым как случайная величина с заданным законом распределения. Качество обслуживания характеризуется следующими показателями: для систем с отказами — средней долей отказов, вероятностью обслуживания всех заявок в определенный интервал времени; для систем с ожиданием — средним временем ожидания, средней величиной очереди и т. д.; для систем смешанных используют все перечисленные показатели.

Возможны более сложные системы обслуживания: с приоритетом, с управлением, с надежными и ненадежными каналами.

Располагая структурой объекта проектирования как сложной системой, а также моделью сопряжения элементов и моделью самих элементов, можно расчетным путем установить состояния объекта в интересующие моменты времени. Подобного рода действия имитируют реальный объект, потому-то и само моделирование носит название имитационного. Подготовка модели требует специалистов высокой квалификации. Выполнение расчетов на ней весьма трудоемко из-за большого числа вычислительных операций. Проведение имитационного моделирования практически становится возможным лишь при использовании ЭВМ. Однако если ограничиться ее применением только для расчетов, то подготовка модели и разработка специальных программ их испытаний все еще будет оставаться серьезным препятствием для применения имитационного моделирования.

Снижение трудоемкости построения и реализации моделей достигается применением формализованных процедур, описываемых специальным языком моделирования: СИМСКРИПТ, СИМПАК, СИНГ, СИМУЛА и т. д. Еще большие возможности для снижения трудоемкости дает модульное построение модели и использование универсальной программы имитации.

В качестве примера используем имитационное моделирование для описания работы землеройной машины в грунтах с твердыми включениями. В данном случае в качестве системы будем рассматривать саму машину, а случайными воздействиями на нее встречу рабочего органа с твердыми включениями. Под твердыми включе-

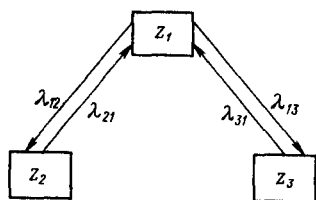


Рис. 4.16. Граф состояний системы «землеройная машина — грунт»

ниями понимаем попадающие в массиве грунта валуны, осколочные твердые породы или металлические предметы. Область состояний системы можно представить множеством из трех элементов: машина работает в грунте без твердых включений (z_1), машина работает преодолевая твердые включения (z_2), машина стоит при встрече с непреодолимым включением (z_3). Переход системы из одного состояния в другое описывается случайным

процессом с дискретным вмешательством случая. На рис. 4.16 представлен граф состояний системы. Из каждого состояния можно попасть в любое другое за конечное число шагов. Система эргодична, и для нее существуют финальные вероятности состояний.

Потоки событий, переводящие систему из одного состояния в другое, — пуассоновские. Они стационарны, т. е. вероятность числа событий на участке времени зависит только от его протяженности и не зависит от того, где расположен этот участок на оси $0t$; ординарны, так как вероятность появления на элементарном участке времени двух или трех событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного; без последствия, так как число событий, попадающих на один из непересекающихся участков времени, не зависит от числа событий, попадающих на другие участки.

Случайный процесс перехода системы из одного состояния в другое может быть отнесен к марковским, так как имеет непрерывное время и дискретное состояние.

Уравнения Колмогорова для состояний системы:

$$\begin{cases} \lambda_{12}p_1 + \lambda_{13}p_1 = \lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3; \\ \lambda_{21}p_2 = \lambda_{12}p_1; \\ \lambda_{31}p_3 = \lambda_{13}p_1, \end{cases}$$

где λ_{ij} — плотность потоков событий, переводящих систему из одного состояния в другое; p_i — финальные вероятности состояний системы.

Заменяя нормировочными условиями одно из уравнений, например третье, найдем систему для отыскания финальных вероятностей состояний:

$$\begin{cases} \lambda_{12}p_1 + \lambda_{13}p_1 = \lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3; \\ \lambda_{21}p_2 = \lambda_{12}p_1; \\ p_1 + p_2 + p_3 = 1. \end{cases} \quad (4.17)$$

Плотность потоков событий можно выразить через среднее время пребывания системы в том или ином состоянии $\lambda_{ij} = 1/t_{ij}$.

Так, плотность потока событий, переводящих систему из первого состояния во второе (λ_{12}), определяется средним временем

непрерывной работы до встречи с преодолимым твердым включением (t_{12}). Пусть это время составит 2,2 мин. Тогда $\lambda_{12} = 0,45$.

Среднее время непрерывной работы машины до встречи с непреодолимым твердым включением (t_{13}) полагаем равным 3,3 мин и тогда $\lambda_{13} = 0,3$.

Среднее время пребывания машины в состоянии преодоления твердого включения (t_{21}) принимаем 0,47 мин и, следовательно, $\lambda_{21} = 2,13$.

Среднее время простоя машины при встрече с непреодолимым твердым включением считаем равным 0,3 мин и отсюда $\lambda_{31} = 3,3$.

Подставив значения λ_{ij} в систему (4.17), получим

$$\begin{cases} 0,45p_1 + 0,3p_1 = 2,13p_2 + 3,3p_3; \\ 2,13p_2 = 0,45p_1; \\ p_1 + p_2 + p_3 = 1. \end{cases}$$

Решив систему, найдем финальные вероятности состояний: $p_1 = 0,77$, $p_2 = 0,16$, $p_3 = 0,07$.

Построим вычислительный эксперимент. Для этого рассмотрим работу машины в течение одного часа. Моделирование состояния системы будем проводить в фиксированные моменты времени с помощью датчика равномерно распределенной случайной величины e_n с характеристиками: $f(e_n) = 1$, $0 \leq e_n \leq 1$; $m_{e_n} = 0,5$, $\sigma_{e_n} = 0,5/\sqrt{3}$.

Разобьем отрезок числовой оси от 0 до 1 на участки, пропорциональные финальным вероятностям состояний: первый участок, пропорциональный p_3 на числовой оси занимает значения от 0 до 0,07, второй, пропорциональный p_2 , — от 0,07 до 0,23, третий, пропорциональный p_1 , — от 0,23 до 1. Выдача датчиком значения случайной величины $0 \leq e_n \leq 0,07$ означает попадание системы в третье состояние, при $0,07 < e_n \leq 0,23$ система приходит во второе состояние и при $0,23 < e_n \leq 1$ — в первое.

Эксперимент будет протекать следующим образом. В начальный момент времени ($t = 0$) определяется по датчику случайных чисел состояние системы. Для первого состояния время получает приращение, равное шагу его изменения (принимаем $\Delta t = 0,5$ мин), для второго и третьего состояний приращение времени равно средней продолжительности пребывания в соответствующем состоянии ($\Delta t = 0,47$ мин для z_2 и $\Delta t = 0,3$ мин для z_3). На каждом шаге определяется выработка машины.

В конце шага времени вновь определяем по датчику случайных чисел состояние системы. Так поступаем до тех пор, пока суммарное приращение времени не достигнет одного часа. Общая выработка машины равна сумме ее составляющих по всем участкам времени.

Предполагаем, что производительность машины, работающей в состоянии z_1 , равна 18 м/ч, а в состоянии z_2 — уменьшается вдвое и равна 9 м/ч.

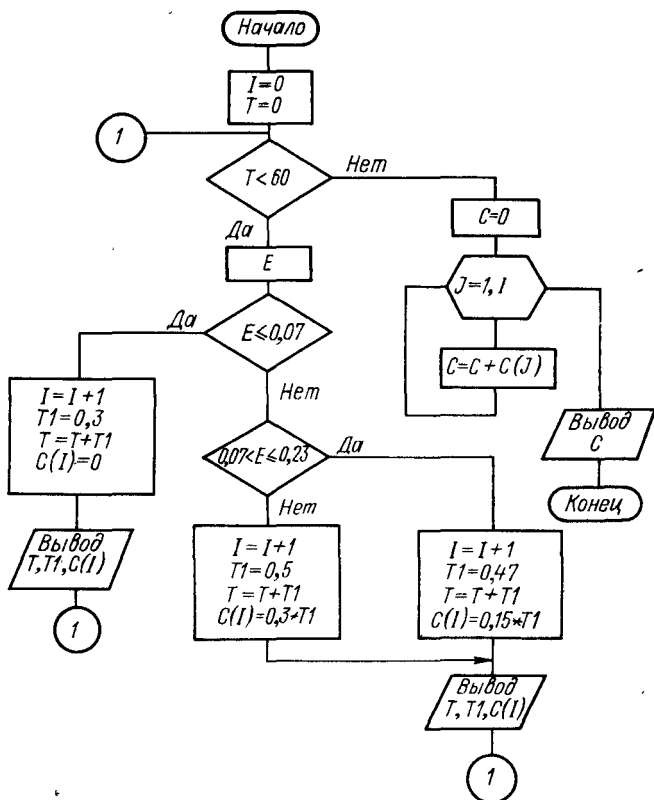


Рис. 4.17. Алгоритм вычислительного эксперимента

Алгоритм вычислительного эксперимента представлен на рис. 4.17, используемые идентификаторы приведены в табл. 4.14.

Таблица 4.14

Идентификаторы на схеме алгоритма вычислительного эксперимента по определению выработки землеройной машины

Наименование переменной	Идентификатор
Входные переменные	
Время	T
Счетчик циклов работы машины	I
Значение случайной величины	E
Выработка машины за цикл	$C(I)$
Шаг изменения времени	T_1
Выходные переменные	
Суммарная выработка за час	C

Таблица 4.15

Результаты вычислительного эксперимента

<i>T</i>	<i>E</i>	<i>TI</i>	<i>C (I)</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>TI</i>	<i>C (I)</i>
0,00	0,0925	0,47	0,0705	24,51	0,6591	0,50	0,1500
0,47	0,7496	0,50	0,1500	25,01	0,4564	0,50	0,1500
0,97	0,7152	0,50	0,1500	25,51	0,4150	0,50	0,1500
1,47	0,5259	0,50	0,1500	26,01	0,7047	0,50	0,1500
1,97	0,1945	0,47	0,0005	26,51	0,4616	0,50	0,1500
2,44	0,1256	0,47	0,0705	27,01	0,4929	0,50	0,1500
2,91	0,1030	0,47	0,0705	27,51	0,7875	0,50	0,1500
3,38	0,0496	0,30	0,0000	28,01	0,5751	0,50	0,1500
3,68	0,9852	0,50	0,1500	28,51	0,2818	0,50	0,1500
4,18	0,8701	0,50	0,1500	29,01	0,6983	0,50	0,1500
4,68	0,1180	0,47	0,0705	29,51	0,8312	0,50	0,1500
5,15	0,1515	0,47	0,0705	30,01	0,6745	0,50	0,1500
5,62	0,6661	0,50	0,1500	30,51	0,2398	0,50	0,1500
6,12	0,1337	0,47	0,0705	31,01	0,1180	0,47	0,0705
6,59	0,5460	0,50	0,1500	31,48	0,3688	0,50	0,1500
7,09	0,3680	0,50	0,1500	31,98	0,7448	0,50	0,1500
7,59	0,8049	0,50	0,1500	32,48	0,5178	0,50	0,1500
8,09	0,1624	0,47	0,0705	32,98	0,1898	0,47	0,0705
8,56	0,0681	0,30	0,0000	33,45	0,9381	0,50	0,1500
8,86	0,4047	0,50	0,1500	33,95	0,2470	0,50	0,1500
9,36	0,7303	0,50	0,1500	34,45	0,4515	0,50	0,1500
9,86	0,4747	0,50	0,1500	34,95	0,1951	0,47	0,0705
10,36	0,2637	0,50	0,1500	35,42	0,5273	0,50	0,1500
10,86	0,1554	0,47	0,0705	35,92	0,7424	0,50	0,1500
11,33	0,7228	0,50	0,1500	36,42	0,7315	0,50	0,1500
11,83	0,1866	0,47	0,0705	36,92	0,1476	0,47	0,1500
12,30	0,9796	0,50	0,1500	37,39	0,6930	0,50	0,1500
12,80	0,3065	0,50	0,1500	37,89	0,3671	0,50	0,1500
13,30	0,3352	0,50	0,1500	38,39	0,5846	0,50	0,1500
13,80	0,5715	0,50	0,1500	38,89	0,0256	0,30	0,1500
14,30	0,4944	0,50	0,1500	39,19	0,0886	0,47	0,0705
14,80	0,3933	0,50	0,1500	39,66	0,2136	0,47	0,0705
15,30	0,7917	0,50	0,1500	40,13	0,9332	0,50	0,1500
15,80	0,3222	0,50	0,1500	40,63	0,6233	0,50	0,1500
16,30	0,2407	0,50	0,1500	41,13	0,4457	0,50	0,1500
16,80	0,2586	0,50	0,1500	41,63	0,4725	0,50	0,1500
17,30	0,8916	0,50	0,1500	42,13	0,2220	0,47	0,0705
17,80	0,9748	0,50	0,1500	42,60	0,6341	0,50	0,1500
18,30	0,7829	0,50	0,1500	43,10	0,3362	0,50	0,1500
18,80	0,6785	0,50	0,1500	43,60	0,2525	0,50	0,1500
19,30	0,3231	0,50	0,1500	44,10	0,2325	0,50	0,1500
19,80	0,2023	0,47	0,0705	44,60	0,4500	0,50	0,1500
20,27	0,0055	0,30	0,0000	45,10	0,2443	0,50	0,1500
20,57	0,1121	0,47	0,0705	45,60	0,3284	0,50	0,1500
21,04	0,9384	0,50	0,1500	46,10	0,9532	0,50	0,1500
21,54	0,9257	0,50	0,1500	46,60	0,3942	0,50	0,1500
22,04	0,8156	0,50	0,1500	47,10	0,4209	0,50	0,1500
22,54	0,6854	0,50	0,1500	47,60	0,8652	0,50	0,1500
23,04	0,9859	0,50	0,1500	48,10	0,7243	0,50	0,1500
23,54	0,1005	0,47	0,0705	48,60	0,5670	0,50	0,1505
24,01	0,6131	0,50	0,1500	49,10	0,2024	0,47	0,0705

<i>T</i>	<i>E</i>	<i>TI</i>	<i>C (I)</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>TI</i>	<i>C (I)</i>
49,57	0,6113	0,50	0,1500	55,04	0,8368	0,50	0,1500
50,07	0,8936	0,50	0,1500	55,54	0,0959	0,47	0,0705
50,57	0,6758	0,50	0,1500	56,01	0,9572	0,50	0,1500
51,07	0,9020	0,50	0,1500	56,51	0,6167	0,50	0,1500
51,57	0,7736	0,50	0,1500	57,01	0,7191	0,50	0,1500
52,07	0,9161	0,50	0,1500	57,51	0,1753	0,47	0,0705
52,57	0,7702	0,50	0,1500	57,98	0,7830	0,50	0,1500
53,07	0,0735	0,47	0,0705	58,48	0,6311	0,50	0,1500
53,54	0,4374	0,50	0,1500	58,98	0,6686	0,50	0,1500
54,04	0,5795	0,50	0,1500	59,48	0,6750	0,50	0,1500
54,54	0,6312	0,50	0,1500	59,98	0,8548	0,50	0,1500

Суммарная выработка машины за один час работы 16,092 м.

Результатом вычислительного эксперимента стало определение часовой выработки машины в условиях воздействия на нее случайных событий, связанных с встречаей с твердыми включениями. В итоге часовая выработка (табл. 4.15) составила 16,092 м, что на 10,6 % меньше выработки, определенной без учета твердых включений в грунте.

Глава 5. ПРОЦЕДУРЫ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА

5.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА

Эскизный проект представляет собой совокупность конструкторских документов, отражающих принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также его основные параметры и габаритные размеры.

Важно отметить, что технические решения, представленные на этапе разработки технических предложений в виде принципиальных схем, теперь должны получить конструктивное решение. Однако последнее связано лишь с общей компоновкой. Исходя из основного содержания эскизного проекта на этапе его выполнения предусматриваются две процедуры: выбор оптимальных параметров и компоновка.

Компоновка объекта проектирования выполняется с учетом технологичности и эстетичности. Технологичность учитывается: при выборе принципиальной конструктивной схемы; при выявлении составных частей, которые могут быть стандартными или унифицированными или заимствованными; при выявлении условий сборки изделий и составных частей, технического обслуживания

ния изделия; при подготовке производства и определении основных укрупненных данных для технологической подготовки производства; при выявлении номенклатуры используемых конструкционных материалов. Особо следует остановиться на роли художественной проработки на этапе эскизного проекта. Для объектов новой техники, не имеющих аналогов, это, пожалуй, пока единственный наиболее успешный метод общей компоновки.

На стадии эскизного проекта продолжают работы по выявлению патентоспособных решений, которые могут появиться в ходе компоновки объекта; оформляются заявки на изобретения как по устройству, так и по промышленному образцу; выявляются страны или фирмы-потребители объекта, разрабатываются предложения о патентовании изобретений за границей.

В число обязательных документов на стадии эскизного проекта входят: пояснительная записка и ведомость эскизного проекта. Дополнительно могут составляться: чертеж общего вида, габаритный чертеж, теоретический чертеж, ведомость покупных изделий, ведомость согласования применения покупных изделий, программа и методика испытаний, расчеты, таблицы, патентный формуляр.

5.2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ранее было введено понятие параметра, как величины, характеризующей каждый элемент множества технических решений. Выбор параметров машины выделен в специальный этап проектирования в связи с его большой важностью. При сравнении вариантов уже использовались оценки параметров. Однако тогда нас интересовали их относительные значения. На этапе выбора параметров необходимо установить их абсолютные величины.

Параметры по своей значимости неравнозначны. В разделе анализа было введено понятие определяющих параметров системы. К ним отнесены главный и основные параметры. Под главным понимают параметр, наиболее полно отражающий потребительские свойства машины. В его качестве наиболее часто выступают величины, связанные с размером рабочего органа, мощностью двигателя, силой тяги, массой, грузоподъемностью. Основные параметры дополняют главный и находятся с ним в тесной взаимосвязи.

Этап выбора параметров машины состоит в отыскании значений главного и основных параметров. В практике еще бытует метод, когда объект разбивается на функциональные узлы, каждый из которых проектируется в отрыве от остальных. В условиях сложных систем это приводит к отрицательным последствиям. Современные требования диктуют необходимость системного подхода к выбору параметров, связанного с оценкой влияния всех узлов (подсистем) на систему в целом.

В практике проектирования приходится сталкиваться с двумя типами задач выбора параметров. Первый тип задач возникает тогда, когда у проектируемого объекта есть аналог. Само проектирование может состоять в совершенствовании технического устройства, и тогда изменяются не все параметры, а лишь те, которые связаны с этим совершенствованием. Такое проектирование ведется непрерывно вместе с выпуском серийной продукции. К этому же типу можно отнести и задачи, возникающие при проектировании объекта внутри параметрического ряда. В этом случае ранее созданные объекты рассматриваются как модели, и на основе теории подобия выбираются параметры нового типоразмера. Второй тип задач возникает при проектировании принципиально новых объектов, когда нет какой-либо информации о поведении аналогичных систем. Остановимся вначале на выборе параметров объекта внутри параметрического ряда.

5.3. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАШИН ВНУТРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЯДА

Под параметрическим рядом понимают множество изделий (машин), имеющих одинаковые потребительские свойства и отличающихся друг от друга по главному параметру. Потребитель заинтересован в наибольшей густоте ряда, т. е. в большем числе элементов множества. Изготовитель, напротив, стремится сократить параметрический ряд, что повышает серийность производства. Оптимальный параметрический ряд изделий разумно сочетает интересы потребителя и изготовителя, приносит необходимый народнохозяйственный эффект.

Не станем останавливаться на экономическом обосновании параметрического ряда. Для многих машин типоразмеры определены стандартом. В нем указывается главный и некоторые из основных параметров. Так, для автогрейдера стандарт определяет три типа машин по главному параметру — массе. Кроме того, для каждого типа установлены: удельный показатель мощности, высота и длина отвала, скорость движения, дорожный просвет в транспортном положении, угол резания, боковой вынос отвала в обе стороны, заглубление отвала, колесная схема. Для выбора параметров, не определенных стандартом, можно воспользоваться обработкой статистических данных по однотипным машинам, учитывая изменение по времени. Для восстановления взаимосвязи параметров в условиях действия большого числа факторов удобен метод корреляционного анализа. Параметр объекта рассматривается как случайная величина, а степень тесноты линейной зависимости между парами случайных величин определяет коэффициент корреляции

$$r_{xy} = k_{xy} / \sigma_x \sigma_y,$$

где k_{xy} — корреляционный момент величин x , y , представляющий собой математическое ожидание произведения центрирован-

ных величин $(x - m_x)$ и $(y - m_y)$ (m_x и m_y при этом соответственно математические ожидания случайных величин x и y); σ_x , σ_y — средние квадратические отклонения величин x , y .

Чем ближе r_{xy} к единице, тем теснее линейная связь между случайными величинами. Обычно устанавливают корреляционную связь между главными и основными параметрами. Приведем ход исследований при корреляционном анализе:

1) численные значения каждой пары случайных величин (по каждому типоразмеру машины) представляются графически в виде поля точек; 2) определяют коэффициент корреляции, по которому судят о степени тесноты линейной зависимости случайных величин; 3) находят уравнения регрессии (удобнее всего это делать по способу наименьших квадратов); 4) строят границы возможных отклонений.

Так, масса полуприцепного одномоторного скрепера (без тягача) находится в зависимости от вместимости ковша:

$$G_c = (0,9 \div 1,2) q,$$

где G_c — масса скрепера, т; q — вместимость ковша, м³.

Определение параметров на основе их корреляционной зависимости имеет тот недостаток, что ориентирует на некоторые усредненные показатели и не способствует прогрессивному накоплению усовершенствований. В этой связи следует обратить внимание на метод определения основных технических параметров объекта на базе подобия систем, развитой применительно к строительным машинам проф. В. И. Баловневым. Согласно этому методу, необходимо вначале среди машин параметрического ряда отыскать наиболее совершенный типоразмер [8]. Для этого можно воспользоваться некоторым обобщенным показателем эффективности. Так, для землеройных машин

$$P_{NG} = N_{уд}/P_{т.уд}.$$

Здесь $N_{уд} = N/P_t$; $P_{т.уд} = P_t/G$, где N — мощность двигателя машины; P_t — техническая производительность; G — масса машины.

При оценке по обобщенному показателю P_{NG} лучшим является тот типоразмер, для которого $P_{NG} \rightarrow \min$.

Расположив все типоразмеры в ранжированной последовательности по показателю P_{NG} , машину с наименьшим значением P_{NG} принимают за эталон. Далее машину-эталон принимают за модель проектируемой, и по критериям подобия находят масштабы параметров. Так, для землеройных машин в качестве критериев подобия принимают:

$$P_1 = k_k/\gamma_{гр}l; \quad P_2 = T/G;$$

$$P_3 = qr\gamma_{гр}/G; \quad P_4 = \rho; \quad P_5 = f_{ср}; \quad P_6 = \varphi_{сц}; \quad P_7 = \alpha,$$

где k_k — коэффициент удельного сопротивления копанию; l — длина режущей кромки; T — тяговое усилие; G — масса машины;

q — вместимость ковша; $\gamma_{гр}$ — удельный вес грунта; ρ — угол трения; $f_{ср}$ — среднее значение коэффициента сопротивления движению; α — угол резания; $\varphi_{сц}$ — коэффициент сцепления.

Выбор параметров по модели-эталону обеспечивает проектируемой машине показатели на уровне лучших достижений. Однако и этот метод не лишен недостатков. Он не отражает изменения соотношения параметров во времени. В связи с этим его относят к статическому моделированию. В отличие от него динамическое моделирование строится на прогнозировании соотношения параметров. Достоверность прогнозной информации тем выше, чем меньше изменчивость системы. Для построения динамической модели выбирают предпрогнозный (ретроспективный) период и рассматривают в нем изменение параметров во времени. Границы ретроспективного периода определяются конкретными условиями. Для строительных машин они берутся в пределах от 5 до 15 лет. Срок прогнозного периода может быть принят равным половине ретроспективного.

Зависимость изменения параметров от времени в ретроспективный период распространяется на будущее в пределах прогнозного срока. Так, возрастание вместимости ковша самоходного скрепера подчиняется зависимости

$$q = (0,94 \div 1,06) 10,23t^{0,199},$$

где t — год в прогнозный период.

Мощность тягача в функции времени можно представить в следующем виде:

$$N = (0,96 \div 1,04) (20,073 + 1,35t - 0,02t^2).$$

5.4. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАШИН, НЕ ИМЕЮЩИХ АНАЛОГОВ

Второй тип задач выбора параметров связан с проектированием принципиально новых машин. Решение их проводится в два этапа: построение математической модели проектируемой системы и вычисление оптимальных значений параметров.

Математическая модель выражается зависимостью между параметрами. Она может быть установлена на основе физического моделирования, выполненного на предыдущем этапе, или, если моделирование не проводилось, теоретически. Для построения математической модели проектируемый объект представляют в виде системы, на входе которой элементы характеризуют условия эксплуатации, а на выходе — готовый продукт. Вход и выход системы представляют в виде множеств:

$$P_{(уэ)} = \{\rho_{(уэ) 1}, \rho_{(уэ) 2}, \dots, \rho_{(уэ) n}, t\};$$

$$P_{(вых)} = \{\rho_{(вых) 1}, \rho_{(вых) 2}, \dots, \rho_{(вых) m}, t\},$$

где $\rho_{(уэ) i}$ — параметры условий эксплуатации; t — время; $\rho_{(вых) j}$ — параметры, характеризующие продукцию.

При этом рассматривается функция

$$\Phi(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^m \lambda_j \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Необходимое условие максимума функции, а также λ_j находят из системы уравнений связи и

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} = \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial \Phi}{\partial x_n}.$$

При нахождении экстремума целевой функции многих переменных может быть получена сложная система уравнений. Для ее решения зачастую прибегают к численным методам (итерационный, градиентный, метод Ньютона и др.). Численные методы могут быть использованы не только как вспомогательные при решении системы уравнений, но и как самостоятельные для отыскания локальных максимумов целевой функции. При выборе параметров машины может оказаться, что целевая функция линейна, линейны и ограничения, накладываемые на некоторые из переменных. В такой постановке возникает задача линейного программирования, а формулируется она в стандартном виде следующим образом.

Требуется максимизировать целевую функцию

$$F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

при $m < n$ линейных ограничениях-равенствах

$$a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + \dots + a_{kn}x_n = b_k; \quad k = \overline{1, m},$$

и n -линейных ограничениях-неравенствах

$$x_i \geq 0; \quad i = \overline{1, n}.$$

Наиболее общим методом решения задачи линейного программирования является симплекс-метод. Следует отметить, что повышение эффективности системы может быть связано и с уменьшением ее показателя (например, приведенные удельные затраты). В этом случае целевая функция подлежит минимизации.

Нередки случаи, когда при выборе параметров машин целевая функция или ограничения оказываются нелинейными. Тогда возникает задача нелинейного программирования. Решение ее в настоящее время рациональнее всего вести численным методом.

Особую сложность вызывают задачи, в которых нельзя ограничиться для выбора параметров одним критерием. Нужно отметить, что такого рода задачи возникают в процессе проектирования весьма часто. В связи с этим заслуживает внимания метод, упоминающийся в литературе под именем его авторов, — метод Соболя—Статникова. Рассмотрим основы этого метода.

Проектирование реальных объектов, как отмечается в работе [49], с учетом многих критериев качества обычно имеет характер эвристического итерационного процесса: конструктор, рассматривая различные варианты модели, оценивает результаты, уточняет

постановку задачи, затем снова решает ее и анализирует новые варианты. В процессе проектирования нередко меняются взгляды на значимость отдельных критериев. И это продолжается до тех пор, пока конструктор не решит, что пришло время остановиться: найдено то, что ему нужно.

На практике стараются избежать многокритериальных задач, сводя их к однокритериальной. По мнению авторов работы [49], это приводит к решению задачи, неадекватной исходной, и никакой метод оптимизации здесь не спасет.

Особенность предлагаемого метода — систематический просмотр многомерных областей (в качестве пробных точек в пространстве параметров используются точки равномерно распределенных последовательностей).

Математически модель объекта зависит от параметров $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, которые могут быть как размерными, так и безразмерными.

Пространством параметров называется n -мерное пространство, состоящее из точек A_p с дискретными координатами $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$. В пространстве параметров вводят параметрические и функциональные ограничения. Первые составляют выражения

$$\alpha_j^* \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{**}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (5.1)$$

где $\alpha_j^*, \alpha_j^{**}$ — нижние и верхние границы параметра.

Ограничения (5.1) выделяют в пространстве параметров параллелепипед $P_p = \{A_p | (1)\}$. Для двух параметров он условно показан на рис. 5.1.

В общем случае объем параллелепипеда

$$V_p = (\alpha_1^* - \alpha_1^*) \times \dots \times (\alpha_n^* - \alpha_n^*).$$

В основу рассматриваемого метода оптимизации положено зондирование параллелепипеда конечным числом пробных точек.

Функциональные ограничения в общем виде соответствуют выражению

$$c_e^* \leq f_e(A_p) \leq c_e^{**}; \quad e = \overline{1, t}, \quad (5.2)$$

где $f_e(A_p)$ — некоторые функции от параметров $A_p = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, которые могут быть заданы явно, или функциональные зависимости от интегральных кривых дифференциальных уравнений.

Предполагается, что $f_e(A_p)$ непрерывны в пространстве параметров. Обозначим область, принадлежащую P_p и ограниченную $f_e(A_p)$,

$$G_p = \{A_p | (1), (2)\}.$$

Графическое изображение области G_p представлено на рис. 5.2.

Критерии качества представляют характеристики системы, которые связаны с ее качеством монотонной зависимостью

$$\Phi_1(A_p), \dots, \Phi_k(A_p).$$

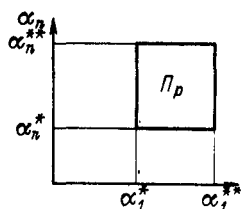


Рис. 5.1. Пространство параметров в условиях параметрических ограничений

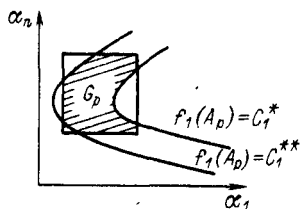


Рис. 5.2. Пространство параметров в условиях параметрических и функциональных ограничений

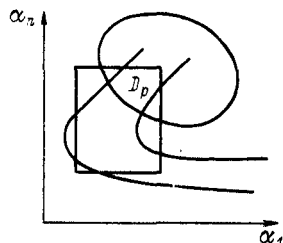


Рис. 5.3. Пространство параметров в условиях параметрических, функциональных и критериальных ограничений

Примем, что по условиям задачи $\Phi_v(A_p)$ стремятся минимизировать; функции $\Phi_v(A_p)$ предполагаются непрерывными в P_p ; вводится критериальное ограничение

$$\Phi_v(A) \leq \Phi_v^*; \quad v = \overline{1, k}. \quad (5.3)$$

Область пространства параметров, удовлетворяющая всем трем видам ограничений,

$$D_p = \{A_p | (1), (2), (3)\}.$$

Графически она изображена на рис. 5.3.

Решение задачи сводится к нахождению точки $\hat{A}_p$ в области $\hat{D}_p$ такой, что

$$\Phi(\hat{A}_p) = \min_{A_p \in \hat{D}_p} \Phi(A_p). \quad (5.4)$$

Основная трудность состоит в выборе критериальных ограничений Φ_v^* и в обеспечении непустоты множества допустимых точек. Обоснованный выбор критериальных ограничений невозможен без предварительного исследования системы. При этом необходимо определить возможности системы по каждому из критериев области G_p и, в частности, представить себе диапазон изменения каждого из критериев.

Диалоговый алгоритм исследования (зондирование) пространства параметров состоит из трех этапов.

Этап 1. Последовательно выбираются N пробных точек $A_{p1}, \dots, A_{pN}$. В каждой из них рассчитывается система и вычисляются значения всех критериев $\Phi_1(A_{p1}), \dots, \Phi_k(A_{p1})$. Составляется таблица испытаний (табл. 5.1), в которой точки размещаются в последовательности соответственно:

$$\Phi_v(A_{p1}) \leq \Phi_v(A_{p2}) \leq \dots \leq \Phi_v(A_{p1N}).$$

В таблице, приведенной в качестве примера, показано размещение результатов испытаний объекта по двум критериям.

Таблица испытаний

Номер испытания	Номер точки	Критерий $\Phi_1(A_{pi})$	Номер точки	Критерий $\Phi_2(A_{pi})$
1	10	0,16	1	3,4
2	7	0,17	10	3,8
3	9	0,18	2	4,2
4	3	0,21	8	5,3
5	1	0,25	9	6,2
.	.		.	
.	.		.	
10	2	0,35	3	7,3

Таблица испытаний показывает не только приближенные значения максимума и минимума $\Phi_v(A_p)$ в области G_p , но и частоту тех или иных значений $\Phi_v(A_p)$.

Этап 2. Выбираются критериальные ограничения. Конструктор просматривает таблицу испытаний по каждому критерию, назначает ограничения на Φ_v^* . Нужно помнить, что если Φ_v^* брать неоправданно малым, то множество допустимых точек может оказаться пустым.

Этап 3. Проверяется непустота D_p . Просматривая таблицу испытаний, отыскивают такие точки, которые удовлетворяют всем критериальным ограничениям

$$\Phi_v(A_{pij}) \leq \Phi_v^*.$$

Если в ней существует хотя бы одна такая точка, то область D_p не пуста и задача разрешима. В противном случае следует, вернувшись на этап 2, сделать уступки по некоторым критериям или, вернувшись на этап 1, увеличить число N пробных точек. Если все это не помогает, то можно утверждать, что выбранные критериальные ограничения Φ_v^* несовместимы. Конечно можно допустить, что все же существует точка A'_p , отличная от $A_{p1}, \dots, A_{pi}, \dots, A_{pn}$, в которой выполняются все условия ограничений (1), (2), (3), но окрестность этой точки крайне мала и практически система, соответствующая точке A'_p , будет неустойчивой.

Успех в использовании метода весьма существенно зависит от выбора пробных точек.

Рассмотрим K^n единичный n -мерный куб и связанные с ним определения.

1. Последовательность точек $P_1, \dots, P_i, \dots$ называется равномерно распределенной в K^n , если для любого n -мерного параллелепипеда

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (s_N(\Pi_p)/N) = V_\Pi,$$

где $s_N(\Pi_p)$ — число точек P_i , принадлежащих Π_p ; V_Π — объем (n -мерный) параллелепипеда Π_p .

2. Последовательность точек $P_1, \dots, P_i, \dots$, принадлежащих ограниченной области G_p , называется равномерно распределенной в G_p , если для любого Π_p , принадлежащего G_p ,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (s_N(\Pi_p)/N) = V_\Pi/V_{G_p}.$$

3. Лемма. Если точки Q_i с декартовыми координатами $(q_{i,1}, \dots, q_{i,n})$ образуют равномерно распределенную последовательность в K^n , то точки A_{pi} с декартовыми координатами $(\alpha_{i,1}, \dots, \alpha_{i,n})$, где при $j = \overline{1, n}$ $\alpha_{ij} = \alpha_j + (b_j - a_j) q_{i,j}$ образуют равномерно распределенную последовательность в параллелепипеде P_p , состоящем из точек $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, координаты которых удовлетворяют неравенствам

$$a_j \leq \alpha_j \leq b_j.$$

Выбор пробных точек производится следующим образом. Выбираются точки последовательности $Q_0, Q_1, \dots, Q_i$. По ним находятся точки $A_p^{(i)} = (\alpha_1^{(i)}, \dots, \alpha_n^{(i)})$, принадлежащие P_p

$$\alpha_j^{(i)} = \alpha_j^* + (\alpha_j^{**} - \alpha_j^*) q_{i,j}; \quad j = \overline{1, n},$$

$q_{i,j} \in Q_i$

При $A_p = A_p^{(i)}$ рассчитывают систему и проверяют выполнение функциональных ограничений (5.2). Если они выполняются, то A_p отбирают в качестве пробной точки в G_p и вычисляются все $\Phi_v(A_p)$; в противном случае $A_p = A_p^{(i)}$ отбрасывается. Схема алгоритма реализации метода представлена на рис. 5.4.

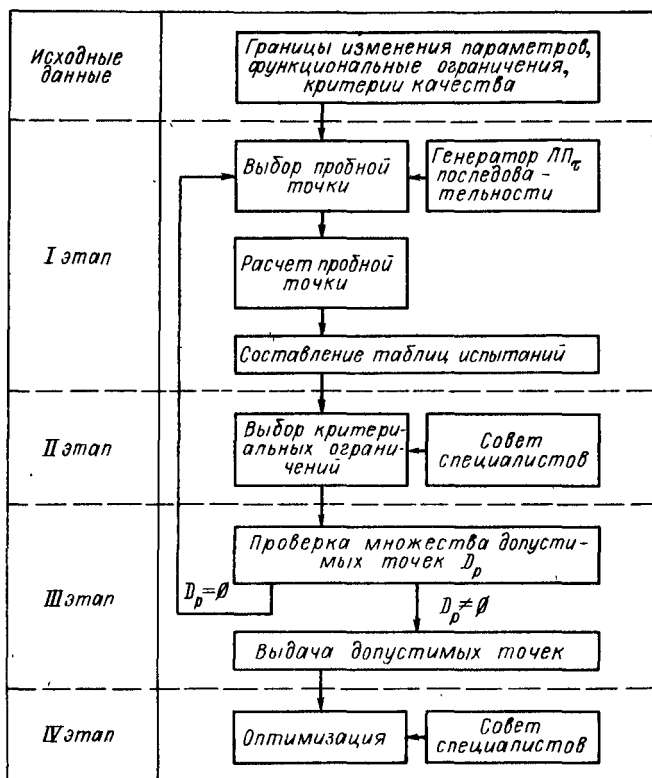


Рис. 5.4. Схема алгоритма выбора оптимальных параметров

Рассмотрим некоторые особенности метода. Если границы c_i^* и c_i^{**} в функциональном ограничении не абсолютны, т. е. могут быть изменены, то можно ввести псевдокритерий

$$\Phi_{k+1} = f_l(A_p).$$

Если по мнению конструктора среднее значение $\bar{c}_l$ было бы «весьма хорошим», то в качестве псевдокритерия удобно ввести величину

$$\Phi_{k+1} = |f_l(A_p) - \bar{c}_l|$$

или

$$c_i^* = \bar{c}_l - \Phi_{k+1}^{**}; \quad c_i^{**} = \bar{c}_l + \Phi_{k+1}^{**}.$$

Иногда конструктора интересует вопрос, к чему приведет сужение основного параллелепипеда? Тогда вводится критерий $\Phi_{k+1} = \alpha_p$, где α_p — координата, по которой происходит сужение параллелепипеда, т. е. $\alpha_p^* \leq \alpha_p \leq \alpha_p^{**}$; $\alpha_p^* < \alpha_p^{**}$. Вводя критериальное ограничение $\Phi_{k+1}^{**} = \alpha_p$, определяется новая область D_p^* . Сравнивая ее с областью D_p (без нового критерия), можно судить о влиянии параметра на область допустимых решений.

Вместо абсолютных значений критериев можно воспользоваться относительными

$$\lambda_v(A_{pi}) = \Phi_v(A_{pi})/\Phi_v(A_{pi,1}).$$

Тогда в таблице испытаний точки располагаются в соответствии с последовательностью

$$\lambda_v(A_{pi,2}) \leq \lambda_v(A_{pi,3}) \leq \dots \leq \lambda_v(A_{pi,N}).$$

Рассмотрим приведенный в [49] пример. В качестве объекта проектирования взят одноступенчатый редуктор. Исходная модель представлена на рис. 5.5 (m_1, m_4 — моменты инерции колес; m_2, m_5 — массы колес; m_3, m_6 — массы подшипников; c_1, c_2 — жесткости колес; c_5 — жесткость зацепления; c_3, c_4 — жесткости подшипников; k_i — коэффициенты демпфирования. Обобщенные координаты системы для этой модели: x_1, x_4 — углы поворота колес; x_2, x_5 — перемещение колес в направлении линии зацепления; x_3, x_6 — перемещение подшипников колес.

Источник возмущения — накопленная погрешность Δ колеса I с амплитудой — Δ_0 определяется как

$$\Delta = \Delta_0 \sin 2\pi f t,$$

где f — частота вращения колеса.

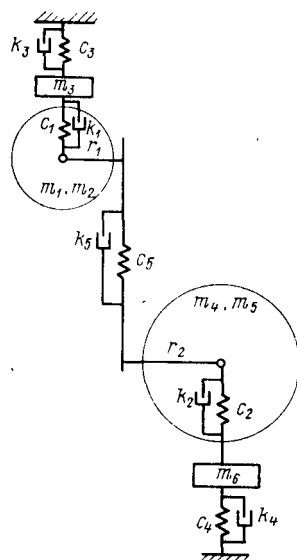


Рис. 5.5. Исходная модель одноступенчатого редуктора для выбора оптимальных параметров

Колебательные процессы в редукторе описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_5 r_1 y + k_5 r_1 \dot{y} &= -c_5 r_1 \Delta; \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1 (x_2 - x_3) + c_5 y + k_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_5 \dot{y} &= -c_5 \Delta; \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_1 (x_2 - x_3) + c_3 x_3 - k_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_3 \dot{x}_3 &= 0; \\ m_4 \ddot{x}_4 - c_5 r_2 y - k_5 r_2 \dot{y} &= c_5 r_2 \Delta; \\ m_5 \ddot{x}_5 + c_2 (x_5 - x_6) - c_5 y + k_2 (\dot{x}_5 - \dot{x}_6) - k_5 \dot{y} &= c_5 \Delta; \\ m_6 \ddot{x}_6 - c_2 (x_5 - x_6) + c_4 x_6 - k_2 (\dot{x}_5 - \dot{x}_6) + k_4 \dot{x}_6 &= 0; \\ y &= r_1 x_1 + x_2 - r_2 x_4 - x_5. \end{aligned}$$

В качестве варьируемых параметров выбраны

$$(m_1, \dots, m_6; c_1, \dots, c_5).$$

За критерии выбраны характеристики виброактивности редуктора: средние и максимальные амплитуды перемещений $\Phi_1 = \bar{a}_3$, $\Phi_2 = \max a_3$, $\Phi_3 = \bar{a}_6$, $\Phi_4 = \max a_6$; средние и максимальные значения амплитуд ускорений подшипников колес I и II $\Phi_5 = \bar{u}_3$, $\Phi_6 = \max u_3$, $\Phi_7 = \bar{u}_6$, $\Phi_8 = \max u_6$; средние и максимальные значения амплитуд динамических усилий, передаваемых с подшипников колес I и II на фундамент $\Phi_9 = \bar{P}_3$, $\Phi_{10} = \max P_3$, $\Phi_{11} = \bar{P}_4$, $\Phi_{12} = P_4$; масса деталей вращения $\Phi_{13} = m_2 + m_5$; число собственных частот, попавших в рабочий диапазон, $f_{\text{нач}} \leq f \leq f_{\text{кон}} (\Phi_{14})$. Допустимые пределы варьирования каждого из параметров были указаны проектировщиком.

В качестве исходной точки A_{p1} выбрана такая, координаты которой находятся в середине заданных пределов. Эта точка таким образом находится в центре параллелепипеда.

Первый диалог с ЭВМ. Проведено 512 испытаний, построена таблица испытаний. В качестве критериального ограничения выбрано значение

$$\Phi_v^* = \Phi_v(A_{p1}),$$

т. е. нужно было выбрать точки не хуже A_{p1} . Таких точек оказалось 45.

Второй диалог с ЭВМ. Критериальное ограничение $\Phi_{14}^* = 2$. Число пробных точек уменьшилось до 4. Выбрана наилучшая пробная точка A_{p416} . Улучшена пробная точка за счет замены координат, близких к границам P_p , на граничные значения. Полученная точка A'_{p416} оказалась лучше A_{p416} , так как была помещена в центр пятимерного параллелепипеда (размерность по числу координат, оставшихся за вычетом тех, которые достигли граничного значения).

Проведено вновь 128 испытаний. Оказалось, что улучшить A_p по всем критериям невозможно, значения $\Phi_v(A_p)$ устойчивы при малых изменениях A_p в окрестности A_p . Среди 128 пробных

точек проектировщик выделил одну, которую считал наилучшей, так как численные значения $\Phi_v(\hat{A}_p)$ мало отличались от $\Phi_v(A_p)$ — поиск был прекращен.

К вышеизложенному в (49) сделано несколько замечаний. Когда выбрана допустимая область D_p , определение оптимальных параметров может быть выполнено: по одному решающему критерию (наиболее простое решение), по нескольким критериям, по двум противоречащим критериям.

Один решающий критерий может быть непосредственно выбран проектировщиком. Можно использовать решающий критерий в виде

$$\Phi = \sum_{v=1}^k c_v \Phi_v(A_p),$$

где $c_v \leq 1$, $c_1 + c_2 + \dots + c_k = 1$.

Можно принять, что решающий критерий есть функции от других критериев

$$\Phi(A_{pi}) = F(\Phi_1(A_{pi}), \dots, \Phi_k(A_{pi})).$$

Применяется и ЛП-поиск. Лучшие с точки зрения проектировщика допустимые точки помещаются в центр P_p , и проводится повторный поиск наилучшей точки. При этом размерность P_p может быть уменьшена за счет исключения из рассмотрения координат, близких к границам первоначального параллелепипеда.

Предположим теперь, что конструктор намерен выбрать оптимальные параметры на множестве m критериев $m < k$ ($\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$).

Условимся говорить, что точка A'_p безусловно лучше, чем точка A_p , если при всех $v = 1, 2, \dots, m$ $\Phi_v(A'_p) \leq \Phi_v(A_p)$ и хотя бы при одном v имеет место строгое неравенство. Если не существует точки $A'_p \in D_p$, безусловно лучшей, чем A_p , то точка A_p называется эффективной. При окончательном выборе параметров объекта следует принимать во внимание только эффективные точки. Однако число пробных точек A_p всегда конечно. Поэтому приходится говорить о приближенно эффективных точках. Может оказаться, что в области D_p приближенно эффективных точек мало или вообще нет. Тогда рекомендуется рассмотреть и некоторые неэффективные точки области D_p .

5.5. КОМПОНОВКА ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА

На стадии эскизного проекта компоновка объекта проектирования выполняется в виде общего вида, теоретического или габаритного чертежа. Чертеж общего вида определяет конструкцию изделия, взаимодействие его основных составных частей и поясняет принцип работы изделия. Теоретический чертеж отобра-

жает геометрическую форму (обводы) изделия и координаты расположения составных частей. Габаритный чертеж содержит контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами.

Различают три вида постановки задачи при компоновке: сборку графического отображения объекта из его составных частей с размещением их конструктором, из его составных частей с учетом определенных ограничений (по площади, габаритным размерам, положению центра масс и др.) в режиме диалога, из составных частей с оптимизацией по заданным критериям в автоматическом режиме.

Во всех случаях компоновка предполагает оперирование с некоторыми функциональными агрегатами или конструктивными модулями. Функциональные агрегаты объединяют унифицированные узлы, типовые проектные решения и проектные решения узлов машины по предшествующим разработкам. Для компоновки общего вида рационально использовать программные средства машинной графики для двухмерных изображений. Функциональные агрегаты и конструктивные модули включаются в базу данных (лучше, если эта база данных будет с иерархической или сетевой организацией).

Составными частями при компоновке общего вида могут быть:

1) конструктивные модели — функционально, конструктивно и технологически законченные (без возможности внутренней доработки) унифицированные сборочные единицы, все параметры которых удовлетворяют модульному ряду и обладают совместимостью; 2) агрегаты — функционально связанные составные части изделия, не обязательно конструктивно и технологически законченные, параметры которых не удовлетворяют модульному ряду, а совместимость достигается конструктивными доработками; 3) базовые изделия — составные части, на основе которых могут создаваться семейства машин; 4) стандартные детали; 5) графические примитивы. Список составных частей приведен в последовательности, соответствующей уменьшению эффективности применения машинной графики при компоновке объекта проектирования.

Наибольший эффект может быть достигнут при блочно-модульном проектировании, меньший — при наличии лишь базовых графических примитивов (точка, линия, поверхность). Все усилия создателей САПР должны быть направлены на разработку технически и экономически обоснованных типоразмерных рядов конструктивных модулей. Достигнув этого можно полностью автоматизировать процесс компоновки, производя его одновременно с составлением структурного описания по заданному функциональному. Для строительного машиностроения в этом направлении уже сделаны первые шаги. В МАДИ под руководством профессора В. И. Баловнева разработана система автоматизированного конструирования конструктивно-размерно-подобных машин [8]. Про-

тотипом для вычерчивания общего вида является геометрический образ машины-эталона. По нему создается база графических элементов, каждый из которых оформляется в виде подпрограммы с формальными параметрами. Обращаясь к ней из основной программы с фактическими параметрами можно получить графическое изображение элемента с необходимыми размерами. Каждый графический элемент имеет собственные оси координат. Для вычерчивания чертежа нужно последовательно вычерчивать элементы с переносом начала их собственных осей координат на требуемое расстояние. Программа для формирования общего вида одноковшового фронтального погрузчика составлена на алгоритмическом языке Фортран-IV для ЭВМ ЕС-1020 с использованием программного обеспечения «Алграф» и графопостроителя ЕС-7054. Этот метод может быть распространен и на компоновку машины не имеющей аналога. Для этого также нужно располагать базой составных частей. Если они организованы иерархически на основе И—ИЛИ дерева, то компоновку общего вида можно выполнять одновременно с составлением структурного описания. По мере выбора вершин, означающих структурные элементы технического решения, вызываются соответствующие им графические изображения, из которых по программе размещения komponуется общий вид. Программа размещения реализует решение задачи в одном из трех видов ее постановки.

Возможен и другой подход. Он связан с выбором технических решений на основе семантического моделирования. Дедуктивный вывод в АС сопровождается выбором конфигураций технической системы с помощью логических связей. Одновременно выбираются составные элементы объекта проектирования, соответствующие необходимым признакам. Основную трудность для постановки автоматизированного выполнения общего вида изделия вызывает создание базы данных составных частей. Сделать это могут лишь специалисты в области проектирования конкретных технических объектов.

Глава 6. ПРОЦЕДУРЫ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

6.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Технический проект содержит совокупность конструкторской документации, отражающей окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации.

Процедуры на стадии технического проекта на процедурной модели объединены общим названием — конструирование машины. В это название вложен определенный смысл. До разработки технического проекта объект получал описания, дающие возможность лишь приступить к следующему этапу проектирования. Описания на стадии технического проекта должны дать возможность приступить к реализации технических решений, а для этого они должны быть конструктивными. Собственно со стадии технического проекта и начинается конструирование.

Обязательными документами технического проекта являются: чертеж общего вида, пояснительная записка, ведомость технического проекта. Дополнительно, в зависимости от характера, назначения или условий производства изделия, могут составляться: теоретический и габаритные чертежи, расчеты, таблицы, схемы, ведомость покупных изделий, ведомость согласования применения покупных изделий, технические условия, программа и методика испытаний, патентный формуляр, карта технического уровня и качества продукции.

Инженер-технолог, участвуя в разработке технического проекта отрабатывает конструкцию на технологичность, добиваясь наилучших значений ее показателей. Художник-конструктор проводит окончательную компоновку машины, прорабатывает конструкцию рабочих мест, средств обеспечения условий обитаемости. Патентными исследованиями обосновывается возможность использования технических решений, защищенных авторскими свидетельствами и патентами, проверяются на патентоспособность вновь создаваемые конструкции, оформляются заявки на изобретения.

6.2. КОНСТРУИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Этапом выбора основных параметров завершается поисковая часть проектирования. Под конструированием понимается воплощение технического решения в конструкцию машины. Этап конструирования так же как и предыдущий этап связан с выбором параметров, но здесь приходится определять все их множество, а не только основные параметры. В процедурной модели выделены два этапа конструирования: 1) объекта, 2) сборочных единиц и деталей. И хотя трудно установить грань между этапами, все же каждый из них имеет свои специфические задачи. Этап конструирования объекта в целом завершается разработкой технического проекта, представляющего необходимые данные для выполнения рабочей документации.

Рабочая документация является основной продукцией проектной организации. Состав технического проекта и рабочей документации определен Единой системой конструкторской документации ГОСТ 2.102—68.

Основным средством конструирования в настоящее время является чертеж, изображающий изделие в прямоугольных проек-

ниях. Основные правила выполнения чертежей, текстовых документов и спецификации определены ГОСТ 2.104—68—ГОСТ 2.109—68. В некоторых случаях при проектировании сложных деталей используется изображение в аксонометрии. Для проектирования изделий, имеющих большие размеры и сложную форму (корпуса судов, самолетов), применяется плазовый метод. На чертеже в крупном масштабе изображаются следы пересечения определенным образом ориентированных плоскостей с поверхностью изделий (ГОСТ 2.419—68).

На этапе конструирования объекта инженер-конструктор работает совместно с дизайнером, добиваясь целостности и выразительности технической формы изделия. В данном случае оказывается полезным макетированием. Работа конструкторов подчинена одной общей цели — обеспечению качества изделия. Нельзя, конечно, полагать, что качество обеспечивается лишь на этапах конструирования. Оно закладывается значительно раньше, еще при поиске вариантов технического решения. Однако лишь при конструировании качество проступает явно. Нередки случаи, когда хорошие технические решения оказываются загубленными из-за неудачного воплощения в конструкцию. И, наоборот, далеко не передовые технические решения живучи из-за хорошо отработанной конструкции.

Процедура конструирования объекта имеет на входе чаще всего схему, главный и основные параметры. На выходе она должна дать необходимую информацию для разработки рабочей документации.

Начинающего конструктора, особенно студента, зачастую смущает собственный чертеж общего вида или сборочной единицы нового технического устройства из-за его примитивности. Нередко это рождает неверие в свои силы и страх перед проектированием. Преподаватель должен объяснить студенту, что его чертеж приобретет «солидность» после проработки всех входящих в него частей. Большую помощь здесь оказывает художественное конструирование.

Конструктор исследовательским анализом разбивает машину на отдельные подсистемы, устанавливая при этом их взаимосвязь. Каждая подсистема характеризуется частными функциями и некоторыми параметрами. На первом этапе в качестве подсистем можно выбрать: силовое оборудование, трансмиссию, рабочее оборудование, ходовое оборудование, раму, подсистему управления. На последующих этапах анализа каждая подсистема разбивается на свои собственные подсистемы и детали. По ходу последовательного выделения подсистем конкретизируется описание объекта. Выбираются механизмы из числа известных или синтезируются новые, при этом можно воспользоваться аппаратом функционально-стоимостного анализа (ФСА). На его основе отыскиваются подсистемы с одинаковыми или близкими функциональными описаниями. Объединяя их в одну группу и устранив

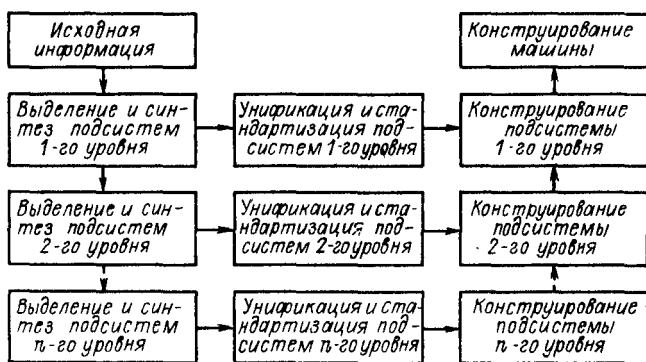


Рис. 6.1. Схема алгоритма конструирования объекта

некоторые отклонения в описании, добиваются унификации подсистем. Схема алгоритма конструирования объекта представлена на рис. 6.1.

Требования сокращения затрат и сроков на освоение новой техники заставляют конструкторов все шире использовать унификацию. Если до недавнего времени она касалась лишь деталей и комплектующих изделий, то сейчас захватила сборочные единицы и даже комплексы. В некоторых отраслях техники (судостроение, робототехника, станкостроение и др.) развивается модульное строение объектов. Из сравнительно небольшого числа функционально замкнутых узлов-модулей комплектуются технические системы, удовлетворяющие определенным, зачастую весьма различным требованиям технологического процесса, в котором они участвуют.

Неотъемлемым требованием при конструировании является соблюдение стандартов. Это условие вызвано стремлением к ускорению технического прогресса, к повышению производительности труда и народно-хозяйственной эффективности. Стандартизация позволяет успешно участвовать в проектировании, изготовлении и эксплуатации технических устройств различными организациями и предприятиями. Она отражает достижения науки, техники, передовую технологию. Стандарты распространяются как на изделия и их составляющие части, так и на техническую документацию.

В рассматриваемом примере проектирования машины для разработки мерзлых грунтов использованы в качестве унифицированных деталей зубчатая пара (шестерня и колесо с внутренним зацеплением) от опорно-поворотного устройства экскаватора и резцы угледобывающего комбайна. Кроме того, дискофрезерное рабочее оборудование выполнено как сменное оборудование к цепному траншейному экскаватору ЭТЦ-161.

Решающее значение для проектирования имеет Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП), определяю-

щая общий для всех отраслей порядок разработки технологической документации. В ЕСТПП как подсистемы входят Единая система конструкторской документации (ЕСКД) и Единая система технологической документации (ЕСТД).

В настоящее время в СССР действует около 20 тыс. стандартов. Ориентироваться в них позволяет Указатель государственных стандартов СССР, в котором выделены отделы, классы и группы стандартов по признакам отраслевой стандартизации. Отдел обозначается заглавной буквой русского алфавита, класс и группа — цифрами. Например, Г 12 означает вторую группу внутри первого класса, входящего в отдел Г «Машины, оборудование и инструмент».

Из всех показателей качества проектируемого изделия на этапе конструирования решающие значения имеют: отработка на технологичность, обеспечение надежности, выполнение эргономических требований и эстетическое оформление. Основные показатели качества к моменту конструирования уже выбраны. Это было сделано на стадии технического задания специальной процедурой. Теперь необходимо реализовать их в конструкции машины. Отработка на технологичность связана со снижением трудоемкости и себестоимости ее изготовления, технического обслуживания и ремонта.

Требуемые показатели надежности обеспечиваются при конструировании: окончательным выбором структурной схемы; использованием резервирования; обеспечением необходимой прочности деталей и рациональной их геометрией, исключающей концентрации напряжений; правильным выбором посадок, точности изготовления, шероховатости поверхностей; обеспечением смазки трущихся поверхностей и другими хорошо известными приемами.

Эргономические требования сводятся в основном к следующему.

Оператор должен иметь достаточное рабочее пространство для выполнения всех необходимых операций управления машиной. Наиболее рациональное положение оператора в кабине «сидя—стоя». В этом случае снижается его утомляемость.

Работа, затрачиваемая оператором на управление, не должна превышать некоторые нормативные значения, зависящие от класса машин. Необходимо стремиться к уменьшению числа рычагов и педалей управления, к снижению потребного усилия и хода. На рис. 6.2, а показаны зоны досягаемости органов управления в горизонтальной плоскости (В, С, Д — зоны легкой досягаемости; А — зона максимальной досягаемости). Зоны досягаемости в вертикальной плоскости представлены на рис. 6.2, б.

Наиболее часто используемые органы управления должны размещаться в зоне легкой досягаемости. Направление перемещения рычагов рекомендуется согласовывать с направлением перемещения объектов управления. Так, выдвижение рукояти одноковшового экскаватора наиболее рационально включать поворо-

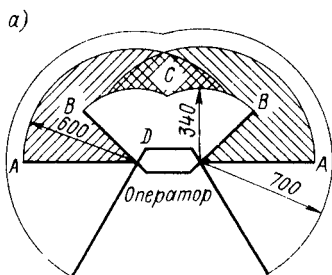
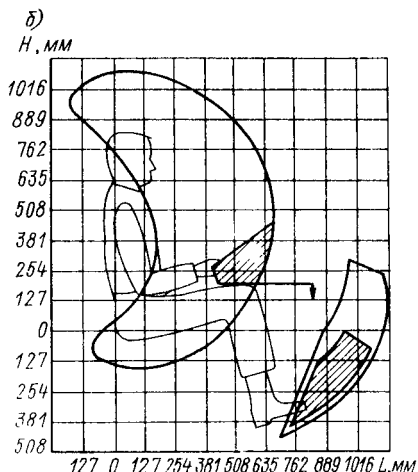


Рис. 6.2. Зоны досягаемости органов управления: а — в горизонтальной плоскости; б — в вертикальной плоскости



том рычага управления от себя; возврат рукояти — обратным движением. Движение рычагов вправо целесообразно связывать с увеличением тех или иных показателей, влево — с уменьшением. Существенное значение для удобства управления машиной имеет кресло оператора, которое на современном техническом уровне представляет собой довольно сложную конструкцию, обеспечивающую виброзащиту, регулировку по высоте и по жесткости в зависимости от размеров оператора.

В своей практической работе над конструированием рабочего места оператора конструктор использует ряд приемов: 1) изображение различных положений оператора в кабине средствами технического черчения; 2) использование плоских шарнирных манекенов; 3) проецирование на чертеж кабины проекционным аппаратом изображений оператора в различных рабочих положениях; 4) объемное макетирование. При конструировании пульта управления весьма важно позаботиться о необходимом количестве и относительном размещении средств отображения (индикаторов). В данном случае нужно руководствоваться следующими основными принципами: индикаторов должно быть ровно столько, сколько необходимо для принятия решения в конкретных случаях использования машины; точность отображения информации должна выбираться в зависимости от точности работы машины; отображение информации должно обладать достаточной наглядностью; в необходимых случаях отображение должно не только сообщать о состоянии объекта управления, но и указывать возможные пути решения оперативных задач. Индикаторы необходимо размещать в зоне наиболее удобной для зрительного восприятия.

Немаловажной для удобства управления оказывается обзорность из кабины управления. Для многих машин, в том числе

и строительных, наблюдение за перемещением рабочего органа оказывается основным источником информации (различают обзорность в горизонтальной и в вертикальной плоскостях).

Гигиенические показатели оценивают вентилируемость кабины, температуру, влажность, давление, запыленность, шум и вибрацию. С ростом количества и энергонасыщенности машин все заметнее становится их влияние на окружающую среду. Это проявляется и в загрязнении воздуха продуктами сгорания при работе ДВС, и в повышении шумности машин, оказывающих вредное воздействие на работающих поблизости людей, и в некоторых других сопутствующих факторах. Влияние технической сферы на среду обитания растительного и животного мира изучается экологией. Ею отрабатываются требования к техническим устройствам, обеспечивающие защиту окружающей среды.

Техническая эстетика — научное направление, изучающее закономерности художественного конструирования технических изделий. Художник-конструктор работает вместе с инженером-конструктором на всех этапах проектирования. По мере продвижения по этапам роль художественного конструирования возрастает. Особенно она заметна на этапе выбора основных параметров и разработки эскизного проекта. Инженер-конструктор добивается высоких технических показателей машины, а художник-конструктор стремится выразить в ее форме назначение и особенности работы, добивается целостности и гармоничности в восприятии.

В некоторых случаях форма изделия существенно влияет на технические показатели (например, самолет, гребной винт, сверло и т. д.) форму изделия определяет в основном инженер-конструктор, добиваясь гармоничности за счет активного воздействия на окружающую среду. Иначе обстоит дело в тех случаях, когда форма изделия не связана тесным образом с техническими показателями. Художнику-конструктору открывается широкое поле деятельности. Эстетические показатели тем выше, чем в большей степени в форме изделия реализуются общие принципы композиции. Под композицией понимается как процесс достижения целостности и гармоничности в форме, так и результат этого процесса. К основным принципам композиции относятся следующие: 1) принцип повторяемости (техническое изделие в целом и отдельные его части должны повторять один определенный элемент формы: этот элемент определяется господствующей в соответствующий момент времени модой); 2) принцип соподчиненности (в технической форме должна ясно восприниматься соподчиненность, выделяться главные и подчиненные элементы); 3) принцип соразмерности (части технической формы и вся она в целом должны быть соизмеримы с определенной мерой); 4) принцип равновесия (форма изделия должна восприниматься зрительно уравновешенной относительно пространственных осей); 5) принцип единства (означает взаимосвязь всех предыдущих принципов, порождающую новое качество композиции — ее целостность).

Основные принципы композиции, добытые многолетней практикой, позволяют дать объективную оценку форме технического изделия. Техническая эстетика определила и ряд приемов или средств к достижению целостной, гармоничной формы.

1. Подход к форме изделия как к объемно-пространственной структуре, состоящей из материально заполненного пространства и пустот. Художник-конструктор рассматривает изделие как некую абстрактную скульптуру. При этом он одновременно учитывает как функциональное назначение изделия, так и художественный замысел.

2. Тектоника, под которой понимается зримое отражение работы конструкции, материала в форме. Изделие, выполненное из чугуна, должно иметь форму отличную от изделия стального.

3. Масштаб и масштабность. Масштаб — действительное соотношение размеров изделия с некоторой мерой, за которую зачастую принимают размеры тела человека. Масштабность — зрительное восприятие размеров изделия.

4. Пропорциональность. Для достижения гармоничности формы изделия отдельные его части должны находиться друг с другом и с изделием в целом в определенной пропорции. Пропорционирование может быть на основе ряда целых или иррациональных чисел, с использованием геометрического подобия фигур. Широко используется «золотое сечение», при котором размер целого так относится к размеру большей его части, как большая часть к меньшей.

В итоге еще раз отметим, что специфика показателей качества современных изделий по своей широте не вписывается в традиционную область профессиональных знаний инженера-конструктора. Для успешного проектирования необходима совместная работа инженера-конструктора, инженера-технолога, психолога и художника-конструктора.

До настоящего времени еще бытует практика, когда кабина и органы управления разрабатываются лишь на последних этапах проектирования без привлечения специалистов по инженерной психологии и художественному конструированию. Такой подход был возможен до тех пор, пока техника была сравнительно проста и не предъявляла серьезных требований к ее управлению. На смену ей пришло системное проектирование, построенное на учете взаимного влияния всех составных частей разрабатываемого объекта. При системном подходе проектируемое изделие рассматривается не просто как технический объект, а как система «человек—машина» (СЧМ). Это обстоятельство заставляет проектировать деятельность оператора и условия его окружения наравне с конструкцией машины. Системное проектирование состоит, таким образом, из трех основных частей: технического, инженерно-психологического и художественного.

Конструктор и технолог заботятся о работоспособности системы, обеспечивают ее надежность, технологичность, эффектив-

ность и другие технические показатели качества. Инженер-психолог в ходе проектирования анализирует функции человека в СЧМ, изучает процесс преобразования информации, разрабатывает принципы построения рабочих мест операторов, изучает влияние психологических факторов на эффективность СЧМ. Художник-конструктор добивается выразительности технической формы объекта, планирует интерьеры рабочих мест операторов, создает особую эстетическую среду, влияющую на состояние человека.

Успех системного подхода к разработке объектов техники зависит от успешного решения задач всех трех составных частей проекта. Немало этому способствует участие специалистов по инженерной психологии и художников-конструкторов уже на ранних стадиях разработки (технического задания и предложения).

К настоящему времени основным достижением системного подхода можно считать выработку предельно допустимых норм деятельности оператора, превышение или понижение которых вызывает нежелательные отклонения в его состоянии. Так, по методике Министерства строительного, дорожного и коммунального машиностроения в комплексный показатель технического уровня машин помимо показателей надежности, технологичности, стандартизации, унификации, патентно-правовых входят и показатели эргономических и эстетических свойств. Эргономические показатели учитывают внутренние габаритные размеры кабины, усилия на рычагах и педалях управления, ход рычагов и педалей, уровень вибрации сидения машиниста, пола кабины, уровень шума, загазованности, запыленности и температуру.

Упомянутая методика вводит некоторую шкалу оценки свойств СЧМ. Однако с ее помощью можно установить лишь соответствие тех или иных единичных свойств предельно допустимым нормам. Вообще разработка и совершенствование шкал измерений свойств СЧМ имеет немаловажное значение в системном проектировании. Имеющиеся шкалы, включая и ту, о которой шла речь, относятся к шкалам порядка. Дальнейшее развитие методов оценки свойств СЧМ должно дать проектировщикам шкалу интервалов, а в будущем и абсолютную шкалу. К недостаткам существующих методов планирования и оценки показателей свойств СЧМ следует отнести и то, что показатели эргономики и особенно эстетики имеют в комплексной оценке технического уровня и качества сравнительно невысокие значения весомости. Так, для землеройных машин непрерывного действия суммарный вес всех показателей эргономики составляет 0,18; а эстетики — лишь 0,04. Некоторые из единичных показателей эргономических свойств имеют вес 0,01. Такое положение приводит к тому, что улучшение или ухудшение некоторых эргономических и эстетических свойств может практически не отразиться на комплексном показателе технического уровня и качества.

Нужен иной подход к оценке, и особенно к планированию, уровней эргономических и эстетических показателей.

Объединим эргономические и эстетические показатели рабочего места оператора одним обобщенным показателем и назовем его уровнем комфорта. Обычно понятие «комфорт» применяют к бытовым условиям, характеризуя им благоустроенность помещений. Используя это понятие к объектам техники, можно охарактеризовать условия обитания человека в СЧМ. Если в процессе работы человек не испытывает энергетических и информационных перегрузок, располагается в удобном кресле и в кабине управления поддерживается постоянная температура и влажность, нет раздражающего воздействия вибрации и шума, запыленности и загазованности и к тому же сама кабина и органы управления удобны и своим внешним видом доставляют человеку удовольствие, то можно сказать, что он находится в комфортных условиях. Разумеется, комфорт есть характеристика психологического состояния оператора, зависящего от внешних условий. То, что в одних условиях будет считаться комфортным, в других может не отвечать этому. Действительно, раскладушка в палатке во время туристского похода может считаться атрибутом комфорта, она же в условиях гостиницы — таковым не является. Немаловажно и то, с какими расходами связан комфорт. Зачастую человек отдает предпочтение менее удобным, но более дешевым условиям обитания. В связи с этим необходимо ввести понятие — уровень комфорта и заранее обосновывать его значение.

Уровень комфорта рабочего места оператора несомненно должен быть связан с общим техническим уровнем машины, продолжительностью работы в течение смены или суток, продолжительностью и сезонностью использования машины в течение года. Выбранный уровень комфорта, таким образом, должен определяться исходя из технических и социальных требований. Нужно предвидеть и его изменение во времени в связи с ростом культурного уровня и материального благосостояния общества. Было бы весьма удобно для проектирования новых и модернизации существующих машин уметь оценивать требуемый уровень комфорта и располагать готовыми решениями для его обеспечения.

Будем исходить из тезиса — более высокий уровень комфорта требует больших расходов на его обеспечение. Тогда представляется целесообразным в качестве показателя, определяющего уровень комфорта, выбрать лимитную цену машины. Лимитная цена является важным экономическим показателем для оценки эффективности проектно-конструкторских решений. Она определена заказчиком и остается неизменной на всех стадиях разработки нового изделия. Лимитная цена ограничивает проектную себестоимость.

Любая машина состоит из шести основных подсистем: рабочего оборудования, трансмиссии, силового оборудования, ходового

оборудования, рамы (металлоконструкции), подсистемы управления.

С учетом этого себестоимость машины можно выразить

$$C_{\Sigma} = \mu \sum_{i=1}^6 C_i,$$

где μ — коэффициент, учитывающий затраты на сборку; C_i — себестоимость основных подсистем.

Допустим, что нам удалось выделить часть себестоимости, приходящуюся на подсистему управления (обозначим ее C_y). Эту величину будем рассматривать как затраты на обеспечение определенного уровня комфорта рабочего места оператора. Желательно выразить C_y как функцию от уровня комфорта, например, в виде диаграммы, представленной на рис. 6.3, где $k = \{1, 2, \dots, n\}$ означает уровень комфорта, $C_{y(k)}$ — затраты на его обеспечение. Теоретически определить зависимость $C_{y(k)}$ от k затруднительно; сделать это проще методом статистического анализа. Для этого прежде всего нужно охарактеризовать каждый уровень комфорта некоторым вектором качества. Компонентами вектора должны быть показатели эргономических и эстетических свойств рабочего места оператора. Такой подход, разумеется, предполагает предварительный выбор требуемых показателей. Современный уровень инженерной психологии и технической эстетики позволяет осуществить этот выбор с достаточной для практических потребностей точностью.

Обеспечение того или иного значения каждого показателя связано с определенными затратами.

Воспользуемся широко применяемой в экономике функцией Кобба—Дугласа и выразим зависимость затрат на обеспечение требуемого уровня комфорта от значений определяющих его компонент вектора качества:

$$C_{y(k)} = A_k \prod_{j=1}^m p_j^{a_j},$$

где A_k — константа; p_j — показатель эргономических и эстетических свойств рабочего места оператора; a_j — некоторая константа, характеризующая вес затрат для достижения заданного значения j -й составляющей вектора качества.

Введем понятие оптимальной стоимостной характеристики уровня комфорта. Под ним будем понимать такой набор элементов рабочего места оператора, включая элементы интерьера, который соответствует выбранному уровню при минимальных затратах для его обеспечения.

В результате сбора статистического материала, установления на его основе регрессионных зависимостей стоимости от значений

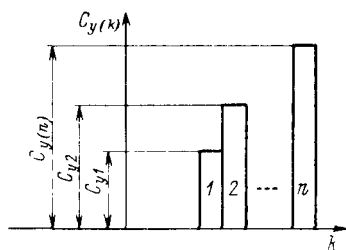


Рис. 6.3. Диаграмма уровней «комфорта» в кабине управления

составляющих вектора качества и решения оптимизационной задачи станет возможным обоснованный выбор как эргономических, так и эстетических показателей качества машины. Более того, изложенный подход к инженерно-психологическому и художественному конструированию определит и требуемый уровень автоматизации управления, а также набор действий оператора.

На одном уровне, например, возможно использование рычагов и педалей управления, на другом — предусматривается кнопочное включение и слежение за процессом работы машины по показаниям приборов. На некотором k -м уровне на долю оператора остается лишь включение и выключение. Сбор информации, принятие решения и его обслуживание в этом случае производится автоматически. Таким образом, автоматизированная система управления должна обеспечивать предусмотренные выбранным уровнем комфорта условия работы оператора. При этом следует помнить, что работа оператора с автоматизированной системой управления освобождает его от физического напряжения, но создает напряжение психическое за счет монотонности, повышенной ответственности и т. д.

Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе показателей уровня комфорта.

6.3. ВЫПОЛНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ

Технические и программные средства автоматизированного проектирования обладают уже в настоящее время большими возможностями. Имеется положительный опыт применения машинной графики в конструировании судов, самолетов, роботов, станков и других технических объектов. Системы интерактивной графики позволяют на экране дисплея или на бумаге с помощью графопостроителя выполнять сложные графические изображения, проводить их аффинные преобразования (сжатие, растяжение, поворот, симметричное отображение), строить проекции поверхностей, штриховать различные области, ограниченные замкнутой линией, наносить выносные элементы и размерные линии, выполнять основные надписи.

Располагая только базовым программным обеспечением, можно выполнять конструкторскую проработку на экране дисплея или на графопостроителе, подавая команды ЭВМ на вычерчивание графических элементов (прямых, окружностей, выносных и размерных линий и др.), подобно тому, как это делается конструктором при обычном черчении. Однако такой подход к машинной графике не дает существенных преимуществ, но требует в то же время специальной подготовки конструктора. Дело заметно улучшается, если ЭВМ снабдить необходимыми данными и знаниями процесса проектирования. Уже имеются в некоторых областях

техники специализированные базы графических данных и прикладные программы для выполнения определенных проектных операций и процедур. В этих условиях конструирование происходит не отдельными графическими элементами, а целой их совокупностью, отражающей составные части объекта (детали, узлы). Помимо этого могут проводиться необходимые расчеты (кинематические, динамические, прочностные). Особенно эффективно в таком режиме работы модульное конструирование объекта.

Все процедуры на стадии разработки технического проекта можно разбить на три группы: выполнение чертежей общих видов объекта и его составных частей, проведение проектировочных и проверочных расчетов, составление различного рода ведомостей, патентного формуляра, пояснительной записки и других текстовых документов.

Наибольшей трудоемкостью в настоящее время обладают процедуры первой группы. Надобность в разработке общих видов составных частей отпадет лишь при проектировании на основе конструктивных модулей. До перехода к такому методу следует ориентироваться на типизацию, которая позволяет вывить структурную однородность составных частей объектов проектирования. На базе типовых структур компоновок могут быть выполнены модификации, которые, однако, не приводят к перестройке общей композиции. Типовые структурные компоновки должны реализовать прогрессивные технические решения. Храниться они могут на магнитных носителях, микрофишах. Каждое описание типовой структурной компоновки в базе данных включает спецификацию составных частей. Для идентификации типовых структурных компоновок можно использовать единую обязательную классификационную систему обозначений изделий и конструкторских документов. Входящий в нее код классификационной характеристики присваивается конструкторскому документу по Классификатору ЕСКД независимо от предметной области. Классификатор реализует иерархический метод характеристики изделий, что удобно для декомпозиции при разработке составных частей объекта проектирования. В характеристику должны быть включены наиболее существенные для целей поиска типовых структурных компоновок признаки: функциональный, служебного назначения, конструктивный, принципа действия, параметрический, геометрической формы, наименования.

Группировки типовых структурных компоновок соответствуют классам, подклассам, группам, подгруппам, видам. Класс объединяет типовые структурные компоновки по функциональной однородности. Внутри класса разделение производится по остальным признакам. Отыскав типовую структурную компоновку, представленную в базе данных в виде файла, и вызвав ее на экран дисплея полностью или по фрагментам, конструктор должен иметь возможность отредактировать ее, исключив или добавив какие-либо детали, изменив размеры, посадки, технические требования.

Вслед за этим типовая структурная компоновка переносится на графопостроитель. Для выполнения проектировочных и проверочных расчетов должна быть создана библиотека прикладных программ на основе собственных разработок и приобретения готовых. Самостоятельную разработку уместно выполнять в тех случаях, когда имеются хорошо апробированные алгоритмы, широко используемые в практике проектирования. Для операций и процедур, не имеющих таких алгоритмов, целесообразно заимствовать программное обеспечение.

Во многих проектных организациях уже созданы обширные библиотеки программ, включающие расчеты основных деталей машин: зубчатых и червячных зацеплений, валов, соединительных муфт, клиноременных и цепных передач, шлицевых и шпоночных соединений. Для расчета металлоконструкций используются специальные комплексы программ, например ЛИРА. Она предназначена для численного исследования на ЭВМ прочности и устойчивости конструкций, автоматизированного выполнения некоторых операций конструирования. В машиностроении ЛИРА применяется для расчета конструкций транспортных машин, башенных и порталных кранов, дорожно-строительных и горнодобывающих машин, турбин.

ЛИРА построена на применении метода конечных элементов (МКЭ). В ней автоматизированы все этапы решения задач МКЭ, включая процесс генерации расчетной сетки, которая может использовать более 50 различных типов конечных элементов.

С помощью ЛИРА можно получить характеристики напряженно-деформированного состояния: величины перемещений, усилий, напряжений, формы и периоды колебаний, величины и направления трещин.

Результат расчетов может быть выведен на графопостроитель. В этом случае изображаются расчетная схема, схема загрузки, изолинии и эпюры усилий. Автоматически составляемая пояснительная записка дает описание объекта и дополнительные данные по результатам расчета. Имеются сведения о действующих системах автоматизации проектирования некоторых изделий машиностроения и их составных частей: редукторов, гидроприводов, гребных винтов, корпуса судна и др.

В работе [42] можно найти описание систем динамического расчета произвольных механизмов, статического и динамического расчетов механизмов с деформируемыми звеньями, расчета приводов, динамического анализа произвольных схем объемного гидропривода. Развиваются обслуживающие подсистемы. Они используются для выпуска многих конструкторских документов: ведомостей, карт, формуляров.

Стадией технического проекта завершается рассмотрение методического обеспечения автоматизации проектирования. Это, однако, не означает, что на последующих этапах автоматизация разработки не применяется. Напротив, процедуры и операции на

стадии рабочей документации представляют ЭВМ широкое поле деятельности. Это же можно отметить и применительно к технологической подготовке производства — к проведению испытаний опытного образца и всем последующим этапам доведения объекта проектирования до серийного производства.

В данном издании ставилась задача рассмотрения методического обеспечения наиболее сложных для автоматизации стадий разработки, куда относятся процедуры и операции, выполняемые на этапах от технического задания до технического проекта. Здесь наиболее важно развитие проектирующих подсистем САПР. Нельзя полагать, что последующие этапы не представляют трудности для автоматизации. Однако это трудности другого рода, они успешно преодолеваются по мере развития обслуживающих подсистем САПР.

Читатель, наверное, обратил внимание на то, что в качестве примера, иллюстрирующего методики выполнения проектных процедур и операций, чаще всего использовался один и тот же объект, а именно дискофрезерная машина для нарезания щелей в мерзлом грунте. Этот пример связан с реальной разработкой. Машина была изготовлена в виде опытного образца, получила одобрение производителей, экспонировалась на ВДНХ, ее создатели удостоены медалей выставки.

Глава 7. ОРГАНИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ САПР

7.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР

Программное обеспечение САПР представляет собой программы для ЭВМ, входящие как в проектирующую подсистему, так и в обслуживающую. Все программы автоматизированного проектирования составляют пакет прикладных программных средств, ориентированных на решение задач проектирования определенного класса технических систем. В пакет прикладных программ (ППП) входят: монитор (управляющая программа) и набор программных модулей. Монитор управляет функционированием пакета и обеспечивает общение с ним проектировщика. Программный модуль представляет собой программу выполнения некоторой определенной операции или целой процедуры.

Схема, иллюстрирующая состав ППП, представлена на рис. 7.1. На ней показаны программы, реализуемые на определенных этапах проектирования, информационные массивы, составляющие содержание базы данных, а также связи между массивами и программами, программами и конструктором.

Массив *М1* содержит данные, отражающие все существующие технические системы данного класса, включая отечественные и ино-

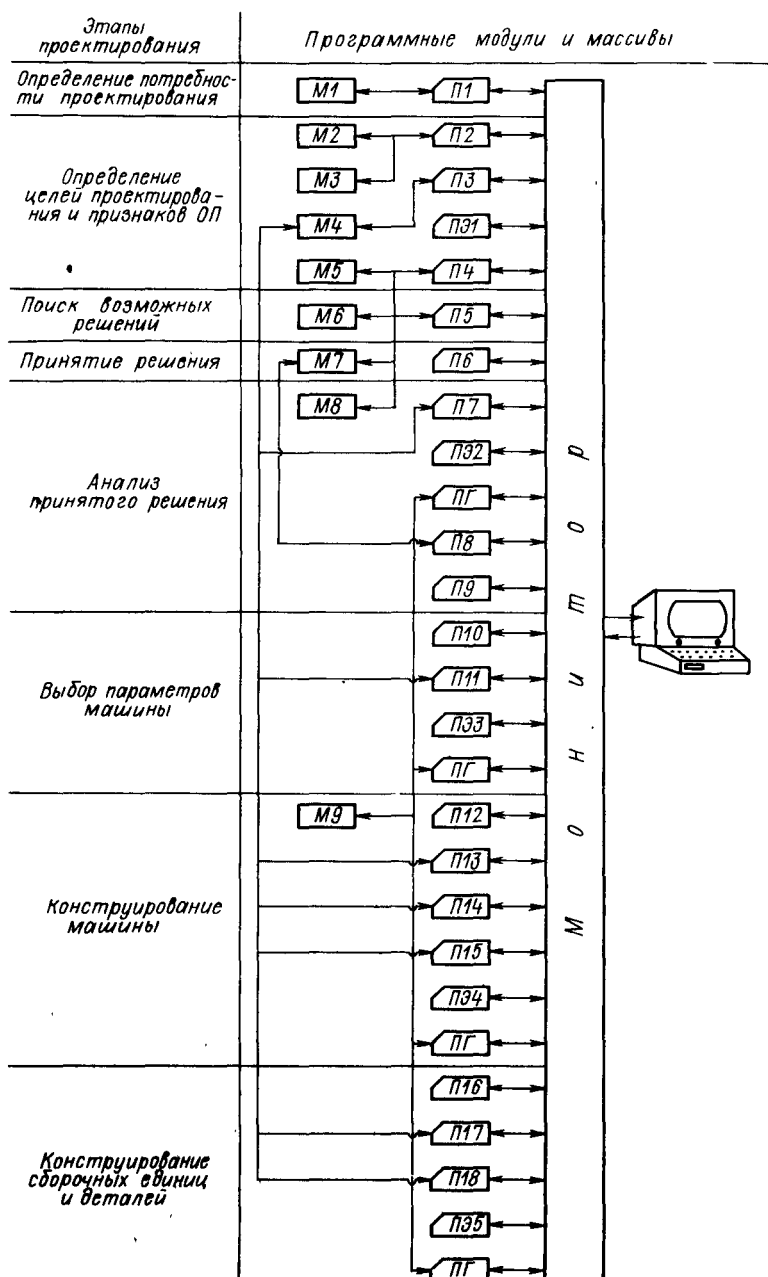


Рис. 7.1. Схема ППП автоматизированного проектирования в машиностроении

странные образцы. В него должны включаться и результаты законченных проектных разработок. Массив постоянно пополняется. Каждый его элемент представляет запись, содержащую сведения о технико-экономических показателях объектов техники и их конструктивных схемах. Набор технико-экономических показателей определяется классом объектов техники. Начинается он с главного параметра, в качестве которого выбирается показатель, в наибольшей степени характеризующий потребительские свойства объекта, и от которого зависят другие показатели.

Массив *М2* объединяет сведения о развитии объектов данного класса технических систем и факторов их окружения. По запросу, обращенному к массиву, должна быть получена информация о требованиях к объекту проектирования в момент его реализации. В число этих требований включаются: научно-технические, социальные, экологические и экономические. На основе массива *М2* составляется сценарий развития технических объектов данного класса, который состоит из отдельных разделов, отражающих прогнозы изменения главного и основных параметров, а также всех выделенных факторов окружения. Сценарий составляется в момент создания автоматизированной системы проектирования, а в дальнейшем пополняется и корректируется.

Массив *М3* формируется на базе массива *М2*. Он организуется в виде графа, вершины которого образуют множество целей, а ребра — связи между ними. В результате обращения к массиву по программе *П2* производится ранжирование элементов подмножества целей, выбранного для данного проектирования.

Массив *М4* содержит требования всех действующих в данной области техники общих и ведомственных стандартов. Это наиболее часто используемый массив. К нему обращаются практически все программы.

Массив *М5* представляется в виде матрицы соответствия между множеством целей и множеством признаков.

Массив *М6* представляется в виде И—ИЛИ дерева технических решений. Дерево содержит в качестве вершин подсистемы и элементы, относящиеся к данному классу технических систем.

Массив *М6* составляется в момент разработки САПР, а в дальнейшем постоянно пополняется за счет массивов *М1*, *М7*, *М8*.

Массив *М7* хранит авторские свидетельства и патенты, относящиеся к рассматриваемому классу технических систем.

Массив *М8* охватывает все физические эффекты, которые используются для поиска вариантов технических решений.

Массив *М9* содержит описание конструктивных модулей, агрегатов, базовых изделий, основных деталей машин и типовых структурных компоновок. Обращение к нему происходит из программ графического отображения проектируемого объекта.

Программа *П1* реализует алгоритм принятия решения о необходимости выполнения проектной разработки. Программа *П2* предназначена для выбора подмножества целей проектирования

среди полного множества с ранжированием целей по важности. Программа *П3* связана с выбором основных признаков объекта проектирования. Комплекс программ *П4* оказывает содействие проектировщику в разработке технического задания; программа *П5* — поиск вариантов технических решений объекта проектирования. Варианты реализуются путем отыскания комбинаций вершин на И—ИЛИ дереве. В процессе ее выполнения производится обращение к массивам *М6*, *М7*, *М8*. Программа *П6* осуществляет выбор оптимального варианта. Она реализует отображение на множество оценок выбранного подмножества технических решений и выбор такого из них, которому соответствует оптимум основной функции проектирования. Комплекс программ *П7* связан с анализом технических решений, а *П8* — с оформлением технических предложений. Последующие комплексы программ реализуют: *П9* — проверку принятого варианта на патентную чистоту; *П10* — выбор оптимальных параметров объекта проектирования; *П11* — разработку эскизного проекта; *П12* — динамический анализ; *П13* — художественное конструирование; *П14* — эргономическое конструирование; *П15* — разработку технического проекта; *П16* — оценку технического уровня объекта проектирования; *П17* — расчет деталей машин и металлоконструкции; *П18* — разработку рабочей документации.

В особую группу выделены программы *П9* — оценки экономической эффективности на различных этапах проектирования и *ПГ* — графического отображения информации.

Организовать работу ППП автоматизированного проектирования целесообразно на основе специальной операционной системы. Она должна обеспечивать: 1) проведение прикладных расчетов объекта с помощью ППП пользователя; 2) создание баз данных для архивов конструкторских документов и всех других информационных массивов; 3) создание компоновок на основе составных частей (модулей, базовых изделий, агрегатов); 4) создание общих видов и сборочных единиц на основе типовых структурных компоновок; 5) выпуск текстовых конструкторских документов в диалоговом и пакетном режимах; 6) создание геометрических моделей объекта проектирования и получение на ее основе проекционных и аксонометрических изображений; 7) создание расчетных сеток на геометрической модели для анализа методом конечного или граничного элемента.

Информационное обеспечение автоматизированного проектирования наиболее рационально построить на основе интегрированной базы данных (ИБД).

ИБД объединяет базы геометрических и графических данных по составным частям (модули, базовые изделия, агрегаты, стандартные детали, типовые структурные компоновки), а также информационно-поисковую систему, методический материал о процессах проектирования, включая базы знаний.

Управляющая программа (монитор) системы должна осуще-

ствлять реализацию процесса проектирования. В ее функции входит: напоминание конструктору о логической схеме процесса проектирования, обеспечение его сведениями о методах решения задач на последовательных этапах проектирования, а также сведениями о средствах математического моделирования объекта проектирования. В связи с этим все программы системы объединяются в программно-методические комплексы (ПМК).

7.2. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ САПР

У читателя, познакоившегося с изложенной концепцией методического обеспечения САПР, очевидно, может возникнуть вопрос — а как будет проходить процесс проектирования, если удастся реализовать все изложенное? Попытаемся на него ответить.

Воспользуемся ранее изложенной процедурной моделью, используя в ней программы, входящие в САПР. Предположим, что работа конструктора организована на базе АРМ с необходимыми техническими и программными средствами.

Конструктор, получив заявку на проектирование объекта технической системы, должен убедиться прежде всего в том, что работа по проектированию действительно необходима. Для этого он вызывает программу *П1* (определения потребности проектирования), используя в качестве основного средства диалога с ЭВМ видеотерминал. Программа предлагает конструктору выполнить ряд операций. Во-первых, убедиться в том, что заявленного объекта не существует в нашей стране (может быть установлено также — не выполнялись ли ранее проектные разработки по подобным объектам). Тому и другому поможет обращение к базе данных по существующим техническим системам и завершенным проектам. Во-вторых, — напомним конструктору, что заданный объект проектирования может входить в число средств, обеспечивающих определенный технологический процесс, изменения в котором могут отразиться на потребности в объекте проектирования. Это должно снизить вероятность появления необоснованных проектных разработок. В объектно-ориентированную САПР может и не входить формализация выполнения такой операции. В этом случае она выполняется конструктором, который сообщает ЭВМ в форме ответа «да» или «нет» свое решение о необходимости проектной разработки с учетом возможного изменения технологического процесса. В-третьих, программа обращением к БД по существующим зарубежным образцам ответит на вопрос о существовании зарубежных аналогов и предложит конструктору задуматься над возможностью его приобретения. Если приобретение объекта за рубежом не исключается, то может быть вызвана программа определения экономической эффективности импорта. В-четвертых, программа дает возможность убедиться в экономической целесообразности создания объекта по пара-

метром, указанным в заявке. В случае, если целесообразность не подтверждается, могут быть определены необходимые изменения в исходных данных на проектирование. Работа программы завершается сообщением о том, нужно или нет выполнять проектирование и почему принято то или иное решение.

Убедившись в необходимости проектирования заявленного объекта, конструктор может перейти к выбору целей. Предварительно он может ознакомиться с особенностями развития технических систем, в область которых входит объект проектирования, установить прогнозные показатели и требования к объекту исходя из факторов его окружения. Все это позволит сделать обращение к массиву информации, определяющему сценарий развития технических систем.

Программа выбора целей П2 предложит полное множество целей на всех уровнях интересов общества. Конструктор, руководствуясь заявкой, сценарием развития и собственными соображениями, отвечая на запрос ЭВМ, отбирает из полного множества некоторые цели, а при необходимости включает в их перечень и дополнительные. Вслед за этим ЭВМ попросит конструктора сообщить о наличии попарной взаимосвязи дополнительных целей с теми, которые входят в полное множество, и о весе всех целей на каждом уровне общественных интересов. После ввода этой информации программа скорректирует веса целей с учетом их взаимосвязи и предложит конструктору перечень целей в ранжированной последовательности по их весу. Просмотрев список, конструктор окончательно отбирает цели проектирования и дает команду запомнить их. На этом завершается работа программы и выполнение второй процедуры проектирования. Приступая к третьей процедуре, конструктор вызывает программу определения основных признаков объекта. Обращением к БД будут выбраны признаки, отвечающие тем из целей, которые входили в полное множество. Если конструктором были указаны дополнительные цели, то программа попросит его по каждой из них сообщить, к какому подмножеству признаков они относятся, выведет на экран видеотерминала все элементы этого подмножества и вновь обратится с просьбой указать на те признаки, как элементы подмножества, которые конструктор считает необходимым учесть. Поступив так со всеми дополнительными целями, программа перейдет к установлению значений признаков. Некоторые из них вводятся конструктором в ответ на запрос, другие вычисляются в ходе обращения к соответствующим подпрограммам. В итоге будет сформировано множество признаков и их значений, которыми должен обладать объект проектирования для удовлетворения поставленных целей.

В рамках традиционного проектирования после выполнения первых трех процедур составляется техническое задание (ТЗ). Для оказания помощи конструктору предусмотрен комплекс программ П4. В него входит программа составления текста тех-

нического задания, оформления карты технического уровня и качества продукции, экономического расчета и расчета норм надежности.

После вызова монитором САПР программы составления текста ТЗ конструктору в ответ на запросы ЭВМ необходимо ввести исходную информацию, предусмотренную заявкой и условиями проведения работ, включая фамилии разработчиков проекта, наименование организаций и фамилии лиц для согласования, завод-изготовитель и др. Выбранные цели проектирования и признаки объекта будут включены программой как переменная информация в соответствующие места ТЗ.

По команде конструктора текст ТЗ, включающий исходную переменную и постоянную информацию в предусмотренном программой формате, будет выведен вначале на видеотерминал, а после его редактирования и на печатающее устройство. На этом завершается первая стадия проектирования. Объект получает концептуальное описание.

Вторая стадия предусматривает разработку технических предложений. Приступая к ней, конструктор вызывает программу поиска вариантов технических решений. По ней происходит обращение к массиву информации, представленной И—ИЛИ деревом технических решений или семантической моделью. И то и другое аккумулирует знания о технических системах определенного класса, включая сведения по уже созданным объектам, заключенные в проектах, авторских свидетельствах и патентах. При поиске вариантов по И—ИЛИ дереву программным путем будут составляться описания вариантов объекта в соответствии с алгоритмом, изложенным в п. 4.4. Используя программы графического отображения, описание можно представить в виде компоновки из включенных в него элементов на экране видеотерминала или на графопостроителе. При использовании семантического моделирования конструктору необходимо по концептуальному описанию, включающему цели проектирования и признаки объекта, составить описание функциональное, а по нему схему логических связей в соответствии с рекомендациями п. 4.4. По логической схеме связей будет выбрана из БД структурная схема, которая и составит вариант объекта проектирования. Здесь, как и в первом случае, описание варианта может быть представлено в виде графического отображения с указанием наименований составных элементов.

Количество вариантов объекта проектирования, полученное с помощью ЭВМ, зависит от мощности множества комбинаций, полученных на И—ИЛИ дереве или в рамках семантической модели. При необходимости конструктор может ограничить поиск вариантов указанием их количества или пределом времени выполнения процедуры.

Среди вариантов могут оказаться абсурдные. Конструктор сразу исключает их из дальнейшего рассмотрения. В некоторые

из вариантов могут быть внесены изменения или дополнения. Конструктор может сам предложить варианты.

Сформировав таким образом множество вариантов технических решений объекта проектирования, следует перейти к выбору оптимального. Для выполнения этой процедуры вызывается соответствующая программа П6. Она прежде всего предложит конструктору отобрать из множества признаков те из них, которые будут использованы в качестве критериев для оценки. К числу таких признаков следует отнести наиболее существенные для достижения выбранных целей проектирования. Абсолютный вес признака-критерия будет установлен программой в соответствии с весом цели проектирования, к которой он принадлежит. По абсолютным весам будут найдены относительные веса так, что их сумма по всем критериям окажется равной единице. Вслед за этим программа предложит конструктору принять решение о дальнейших действиях по трем возможным направлениям: 1) продолжить поиск вариантов, так как не исключается, что оптимальное решение еще не найдено; 2) выполнить предварительный анализ вариантов для более обоснованного их сравнения; 3) приступить к выбору оптимального варианта из уже полученных, руководствуясь лишь экспертной оценкой их признаков. Программа поможет конструктору обоснованно с учетом конкретной ситуации выбрать одно из указанных направлений действий. При выборе третьего направления программа перейдет к оценке вариантов. Если их число невелико, то оценке подвергается каждый. В противном случае варианты группируются по некоторым конструктивным или функциональным особенностям. Среди каждой группы выделяется наиболее типичный представитель. В дальнейшем оценка этого представителя распространяется на всю группу. Теперь конструктор должен дать оценку всем вариантам в 10 бальной системе по каждому критерию. По этим оценкам с учетом важности критериев программа установит приоритет вариантов. За оптимальный принимается вариант с наивысшим приоритетом. Если им оказался представитель целой группы, то процедуру оценки вариантов следует повторить внутри этой группы.

Выбирая второе направление следует обратиться к анализу вариантов, что может быть выполнено с помощью специальной программы из комплекса П7. В результате станет возможным произвести оценку вариантов вычислительным методом. При выборе первого направления достраивается множество вариантов объекта проектирования включением в него новых технических решений, вырабатываемых самим конструктором или ЭВМ при повторном обращении к программе поиска вариантов. После чего конструктор вновь обращается к выбору оптимального варианта.

Выбранный в качестве оптимального вариант подвергается тщательному анализу. Для его выполнения предусматривается комплекс программ П7. Метамоделли, описывающие объект как

комплекс технических систем, позволят оценить затраты на обеспечение всех стадий жизненного цикла объекта, и на этой основе установить достигаемый от его создания и применения народнохозяйственный эффект.

Макромодели дадут возможность получить количественную оценку показателей по признакам объекта, в частности, применительно к технологическим машинам: усилия на исполнительном органе, нагрузки, действующие на звенья механизмов, передаточные отношения, потребную мощность привода, скорости и ускорения звеньев и др.

В комплекс *П7* включается обширный перечень программ, реализующих аналитические методы структурного, кинематического и динамического анализа, используемые традиционно в области техники, к которой принадлежит объект проектирования. В программное обеспечение анализа включаются и объектно-независимые (инвариантные) ППП, в частности, для имитационного моделирования. В результате выполнения процедуры анализа объекта будут установлены его работоспособность, экономическая эффективность, функциональная связь основных параметров, численные значения некоторых из них.

Процедуры поиска вариантов объекта (выбора из них оптимального и его анализ) составляют вторую стадию проектирования, оформляемую в виде технических предложений. Если техническим заданием предусмотрен выпуск конструкторских документов на этой стадии, то следует воспользоваться комплексом программ *П8*, включающим программы оформления пояснительной записки и ведомости технических предложений, чертежа общего вида, таблиц, расчетов.

Третья и последующие стадии проектирования связаны с конструктивным воплощением выбранного варианта объекта (правда, эта стадия связана пока лишь с эскизной конструктивной проработкой). Приступая к ней, конструктор должен выбрать значения всех основных параметров. Некоторые из них уже определены заявкой на проектирование стандартами, а другие могут варьироваться в заданных пределах. Для оптимизации параметров конструктор, в зависимости от выбранного им метода, вызывает соответствующую программу из комплекса *П10*. В комплекс входят программы выбора параметров машин по имеющимся аналогам на основе моделирования и программы, реализующие методы решения экстремальных задач, в частности, весьма удобный и универсальный метод Соболя — Статникова.

По найденным значениям основных параметров вносятся коррективы в компоновку машины. При этом учитывается возможность использования унифицированных узлов, выявляются условия сборки объекта и его технического обслуживания.

Инженер-технолог совместно с конструктором выявляет условия подготовки производства и с этих позиций также вносит некоторые коррективы в общую компоновку. Художник-конструк-

тор эскизно прорабатывает внешнюю форму объекта. Если предусмотрен выпуск конструкторской документации на стадии эскизного проекта, то вызываются программы из комплекса *П11*. Они позволяют: вносить коррективы в чертеж общего вида, оформить пояснительную записку, составить ведомости эскизного проекта, покупных изделий, согласований применения покупных изделий, программу и методику испытаний.

Эскизная проработка объекта позволяет приступить к окончательному конструктивному его воплощению, что выполняется на четвертой стадии проектирования — разработки технического проекта. Конструктор должен выбрать все параметры, характеризующие не только объект в целом, но и его составные части. Для этого требуется провести тщательный динамический анализ механизмов с учетом особенностей характера действующих на него нагрузок. Математические модели, используемые на этом этапе, относятся к микромоделям. Предусмотренный для этого анализа комплекс программ поможет конструктору описать исследуемый механизм в виде системы дифференциальных уравнений, последующее интегрирование которой установит характер и параметры движения звеньев, силы, действующие на них и в кинематических парах. В комплекс входит ППП расчета на прочность методом конечных элементов, программы расчета деталей машин, гидропривода, систем управления и других подсистем машины.

Особыми комплексами выделены программы художественного и эргономического конструирования. Они представляют художнику-конструктору возможность отработать форму объекта, не прибегая к макетированию (за счет аксонометрических и изометрических изображений, пропорционирования и масштабирования, цветового решения).

Программа эргономического конструирования предоставляет возможность обоснованно выбирать требуемый уровень комфорта в кабине оператора исходя из лимитной цены машины и условий ее эксплуатации, составляет описание (текстовое или графическое) рабочего места, обеспечивающего выбранный уровень комфорта, определяет эргономические показатели.

Разрабатывая составные части объекта, конструктор использует БД по конструктивным модулям, агрегатам, базовым изделиям, типовым структурным компоновкам. Конструктивные модули используются без изменений. В базовые изделия и агрегаты могут быть внесены конструктивные доработки по присоединительным элементам. Типовые структурные компоновки дают конструктору лишь принципиальные решения механизма, требующие конкретизации по выбранным параметрам. Для оформления технического проекта предусмотрен комплекс программ *П15*. Обратившись к нему, конструктор может воспользоваться программами: оформления пояснительной записки, составления ведомости технического проекта, ведомостей покупных изделий и согласования

применения покупных изделий, оформления технических условий, программы и методики испытаний, оформления патентного формуляра. Некоторые из этих программ используются и на более ранних стадиях проектирования. Их алгоритм предусматривает разный уровень детализации описаний объекта в соответствии со стадией проектирования.

Технический проект дает окончательное техническое решение и полное представление об объекте проектирования. По нему уже можно достаточно точно судить о техническом уровне и качестве изделия. Определить их показатели поможет специальный комплекс программ *П16*. Входящие в него программы используются и на более ранних стадиях проектирования, однако в полном объеме весь комплекс используется лишь в завершении технического проекта.

На стадии разработки рабочей документации конструктор выполняет разработку сборочных единиц и деталей. Для этого он использует общие виды составных частей, выполненные на стадии технического проекта, конкретизируя их размерами, обозначениями посадок и других соединений, техническими требованиями и указаниями, обеспечивающими полную и непротиворечивую информацию для сборки соответствующих узлов.

В процессе работы с чертежом на экране видеотерминала конструктор, используя комплекс программ *П18* разработки рабочей документации, получает возможность вносить коррективы и дополнения, обращаться к массиву информации по стандартам регламентирующим правила выполнения чертежей, к нормативным документам по посадкам и другим видам соединений. Специальная программа обеспечит составление спецификации на сборочный чертеж.

Работая над детализовкой конструктор использует типовые конструктивные решения, вызывая их из массива конструктивных элементов в БД согласно «меню». Оригинальные детали выполняются построением на экране видеотерминала с помощью базовых графических элементов (прямых, дуг, окружностей и др.) с последующим получением твердой копии изображения на графопостроителе. В расчете геометрии деталей машин, их массы, в выборе точности изготовления и чистоты обработки, в расчете размерных цепей поможет комплекс программ *П17*.

Приведенная методика проектирования пока полностью не реализована. Однако для ее воплощения в практику есть объективные предпосылки.

7.3. РЕКОМЕНДАЦИИ К РАЗРАБОТКЕ И ВНЕДРЕНИЮ САПР

В настоящее время большинство проектных организаций и научно-исследовательских институтов, занимающихся опытно-конструкторскими работами, в той или иной мере внедряют элементы и подсистемы САПР, преодолевая в общем-то одинаковые

трудности. Они связаны с недостаточной обеспеченностью техническими средствами, с их ненадежностью, с отсутствием необходимого программного обеспечения, с организационной неустроенностью. Весьма важен для внедрения САПР и человеческий фактор. Нужно учитывать, что САПР стала внедряться в практику проектирования объектов машиностроения достаточно широко лишь в течение последнего десятилетия. Опыт ведущих конструкторов сложился в рамках традиционного ручного проектирования, и этот опыт еще позволяет создавать машины, отвечающие научно-техническому прогрессу, что порождает пока еще осторожное отношение многих опытных конструкторов к САПР. И это во многом обоснованно. Большинство созданных подсистем САПР релизуют достаточно сложные методики и алгоритмы расчетных операций, без которых конструкторы ранее обходились. Вот почему нередки случаи, когда имеющиеся в проектной организации достаточно мощные ППП, приобретенные со стороны, не используются.

Там, где САПР только начинает внедряться, весьма полезным окажется проведение предпроектных исследований. Они позволят установить готовность организации к созданию САПР. Автоматизация проектирования не означает лишь приобретение технических средств — ЭВМ и ее периферийных устройств. Она связана и со значительно более трудоемкими работами по другим видам обеспечения: методическому, математическому, программному, лингвистическому, информационному и организационному. Готовность организации к внедрению САПР — это и понимание руководства, что создание САПР — достаточно длительный процесс, требующий к тому же немалых капитальных вложений и привлечения высококвалифицированных специалистов; это и готовность конструкторов к овладению навыков общения с ЭВМ. От некоторых из них потребуются и помощь в разработке математического и программного обеспечения.

Во многих проектных организациях вводится должность главного конструктора САПР. Ему подчиняется группа, лаборатория или отдел в зависимости от масштабов САПР. Главный конструктор САПР должен хорошо разбираться в методическом обеспечении САПР, знать применяемые в организации методы проектирования, видеть перспективы их совершенствования. Лучше всего, если главный конструктор САПР выдвигается из числа молодых, но достаточно опытных конструкторов, прошедших специальную переподготовку по автоматизации проектирования. Весьма полезным оказывается участие в создании САПР ученых и студентов соответствующих вузов.

Можно условно выделить два подхода к созданию САПР: сверху и снизу. Сверху — означает создание алгоритмов и программ выполнения операций и процедур проектирования на ранних его стадиях (технического задания, технического предложения); снизу — предусматривает автоматизацию выполнения про-

цедур и операций на стадиях разработки рабочей документации и технического проекта.

Второй подход, т. е. снизу, более прост и сулит скорейшее получение практических результатов. Многие проектные операции, прежде всего расчетные, и при традиционном (ручном) проектировании выполняются по достаточно жестким алгоритмам. Составить по ним программы для ЭВМ не представляет значительных трудностей. Вот здесь-то и могут оказаться полезными студенты. Под руководством специалистов, выполняющих такие процедуры, они познакомятся с методикой их осуществления, составят алгоритм и программу. Можно воспользоваться и уже созданными программами расчета деталей машин, металлоконструкции, гидропривода и др. В этом случае зачастую приходится вносить в программы некоторые изменения, адаптирующие их к условиям проектной организации. Правда, нередко (особенно при неполном или некачественном сопровождении программ) эта работа становится настолько трудоемкой, что побуждает отказаться от готовых программ и создавать собственные. Кроме того, замечено, что конструкторы охотней используют программы, составленные по известным им методикам.

Подход снизу, хотя и прост, но не может, однако, принести результатов, кардинально улучшающих процесс проектирования и по срокам, и по качественным показателям.

Целесообразно походить к созданию САПР одновременно и сверху и снизу. На этом пути можно условно обозначить ряд ступеней.

Ступень 1. Автоматизация расчетов деталей машин, металлоконструкции, гидропривода, технико-экономических и кинематических параметров машин и др.

Ступень 2. Создание информационных массивов и на их основе баз данных и баз знаний, включая базу структурных элементов в виде базовых изделий, агрегатов, модулей, стандартных изделий, типовых структурных компоновок.

Ступень 3. Автоматизация процедур на стадии рабочей документации и технического проекта, включая компоновку объекта проектирования и его составных частей, выпуска чертежной конструкторской документации.

Ступень 4. Автоматизация процедур на стадии эскизного проекта, технических предложений, технического задания, выпуска текстовой конструкторской документации.

Автоматизация проектирования на первых двух ступенях еще не может существенно снизить трудоемкость работ и повысить качественные показатели изделия. Лишь достижение третьей и четвертой ступени обеспечит кардинальное сокращение сроков разработки новой техники.

В заключение отметим, что автоматизация проектирования стала составной частью нынешнего этапа научно-технической революции. Ее успехи уже не оставляют места для скептического

отношения. Созданные системы существенно сокращают сроки разработки, способствуют повышению качества объектов проектирования. Отличительной особенностью второго поколения САПР стало преимущественное развитие обслуживающих систем. Они обеспечивают снижение трудоемкости работы с текстовыми и графическими документами, облегчают поиск необходимой информации, дают возможность геометрического моделирования, ранее редко используемую из-за сложности и больших трудовых затрат. Развиваются и проектирующие подсистемы. Уже привычно использование ЭВМ для выполнения расчетов деталей машин, металлоконструкций, кинематического и динамического анализа, моделирования.

Новое третье поколение САПР охватит процедуры, связанные с принятием решений на ранних стадиях проектирования. Большие надежды возлагаются на развитие искусственного интеллекта и особенно на экспертные системы с базами знаний.

Экспертные системы должны впитать в себя все знания и опыт, добытые в деле проектирования объектов в конкретной области техники. Формируются они в виде набора правил, с помощью которых ЭВМ может строить логические выводы на уровне опытного специалиста. Построению таких систем и служит эта книга. В нее вошли наиболее продуктивные, по мнению автора, методы выполнения проектных процедур и операций, ориентированных на широкое использование ЭВМ нынешнего поколения. Многие из описанных операций и процедур уже обеспечены программными средствами. Составить программы для других не представляет принципиальных трудностей. Автор надеется, что изложенная в книге концепция заинтересует специалистов, занимающихся разработкой САПР, побудит в них желание реализовать те или иные методы, самим подумать о повышении интеллектуального уровня автоматизированных систем проектирования.

На кафедре строительных и дорожных машин и оборудования ЛИИЖТа создан демонстрационный прототип системы автоматизированного проектирования на ранних его стадиях применительно к щебнеочистительным путевым машинам для промтранспорта.

Предварительными предпроектными исследованиями были вскрыты перспективы и направления развития этой области техники, составлен сценарий, позволивший сформировать полные множества целей проектирования и признаков ОП.

Система включает программы: определения потребности проектирования, выбора целей проектирования, выбора признаков ОП, составления технического задания, поиска вариантов технических решений, выбора оптимального варианта, имитационного моделирования, анализа технических решений, определения оптимальных параметров ОП.

База знаний для поиска технических решений представлена в системе И—ИЛИ деревом, объединяющим около миллиона вариантов, матрицей соответствий, устанавливающей соответствие

функциональных подсистем и элементов технических решений основным признакам из полного их множества, и правил, определяющих несовместимость некоторых из подсистем технических решений, а также предопределяющих в некоторых случаях направление дальнейшего построения допустимой комбинации вершин по И—ИЛИ дереву в случае включения в нее вершины, входящей в правило.

Правила представляются в виде выражений: «если A , то не B », «если A или B , то C », «если A и B , то C » и т. д., где A , B , C — обозначение вершин И—ИЛИ дерева.

Все компоненты базы знаний составлены специалистами в области механизации работ при ремонте железнодорожного пути. В них вошли наиболее перспективные функциональные подсистемы машин данного класса.

В соответствии с алгоритмом, изложенным в п. 4.4, программа поиска вариантов технических решений формирует допустимые комбинации вершин на И—ИЛИ дереве, лучшим образом отвечающие признакам, вошедшим в концептуальное описание, и удовлетворяющие правилам.

Программа выбора оптимального варианта реализует метод, использующий таблицу решений (см. п. 4.5).

По программе имитационного моделирования проверяется работоспособность машины как системы, состоящей из набора функциональных подсистем, каждая из которых может находиться в определенный момент времени в одном из возможных состояний. Смена состояний подчиняется финальным вероятностям.

Программа анализа технических решений позволяет установить энергоемкость, металлоемкость, себестоимость варианта машины исходя из заданной производительности.

Программа определения оптимальных параметров реализует метод Соболя—Статникова и дает возможность установить значения основных величин, характеризующих подсистемы машины и обеспечивающих оптимизацию по критериям, отвечающим целям проектирования.

Пакет прикладных программ автоматизированного проектирования работает под управлением операционной системы РАФОС и включает средства справочного обеспечения и ведения протокола.

К справочному обеспечению отнесены сообщения о методике автоматизированного проектирования, о правилах работы с программами, о языках описания задания, сопровождения и управления.

Проектные процедуры, содержащие большой объем вычислений, представлены в системе на алгоритмическом языке ФОРТРАН, а процедуры, содержащие главным образом диалог с пользователем, — на алгоритмическом языке БЕЙСИК. Обмен данными между программными модулями, а также базы данных организованы с помощью файловой системы.

В протоколе фиксируются: дата выполнения задания, фамилия пользователя и результаты выполнения проектных процедур в виде последовательных описаний объекта проектирования (целевого, концептуального, структурного, параметрического).

В результате использования ППП выполняются процедуры на стадиях технического задания, технического предложения, эскизного проекта.

Доведение демонстрационного прототипа системы автоматизированного проектирования до промышленного образца предусматривает дальнейшую разработку программного обеспечения выпуска всех видов конструкторской документации на стадиях технического предложения, эскизного и технического проектов, т. е. полную реализацию ППП в соответствии со схемой, изложенной в п. 7.1.

Система предусматривает возможность ее постоянного развития. Это достигается изменением и расширением множеств целей проектирования и признаков ОП, но, главным образом, расширением и модификацией базы знаний. Последнее возможно «наращиванием» И—ИЛИ дерева, уточнением матрицы соответствий и увеличением правил.

В завершение еще раз напомним читателю, что системы автоматизированного проектирования не предназначены для замены конструктора. Они способны облегчить его работу в ходе выполнения рутинных процедур и операций, в частности, при выпуске конструкторской документации на основе уже принятых проектных решений. Но этим не ограничивается их возможность. САПР способна лучше организовать процесс проектирования за счет фиксации промежуточных данных. Конструктор может благодаря этому проверить ход рассуждений, выявить в нем допущенные ошибки. Проектные решения, вырабатываемые системой, не обязательны для конструктора, но они помогут ему избежать предвзятости. Системное «мышление» САПР и интуитивное мышление конструктора создают продуктивный симбиоз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация поискового конструирования/Под ред. А. И. Половинкина. М.: Радио и связь, 1981. 344 с.
2. Автоматизация проектирования: Сб. статей. Вып. 1/Под ред. акад. В. А. Трапезникова. М.: Машиностроение, 1986. 304 с.
3. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении/Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, А. Ф. Прохоров и др.; Под общ. ред. Ю. М. Соломенцева, В. Г. Митрофанова. М.: Машиностроение, 1986. 256 с.
4. Алгоритмы оптимизации проектных решений/Под ред. А. И. Половинкина. М.: Энергия, 1976. 264 с.
5. Амиров Ю. Д. Стандартизация и проектирование технических систем. М.: Издательство стандартов, 1985. 310 с.
6. Анискин Ю. П., Моисеева Н. К., Проскуряков А. В. Новая техника, повышение эффективности создания и освоения. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.
7. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике. Справочное пособие в 7 томах. Т. IV: Зубчатые механизмы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 592 с.
8. Баловнев В. И. Проектирование дорожно-строительных машин с использованием оборудования САПР. М.: МАДИ, 1980. 87 с.
9. Бусленко В. Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. 239 с.
10. Быков В. П. К математическому обеспечению автоматизированного проектирования строительных машин. В сб. тр. ЛИИЖТа «Исследование конструкции, надежности и организации ремонта строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин». Л.: ЛИИЖТ, 1984. С. 10—16.
11. Быков В. П. Методика проектирования машин с применением элементов САПР. Учебн. пособ. Л.: ЛИИЖТ, 1986. 60 с.
12. Введение в эргономику/Под ред. В. П. Зинченко. М.: Советское радио, 1974. 352 с.
13. Волков Д. П., Николаев С. Н. Надежность строительных машин и оборудования. М.: Высшая школа, 1979. 400 с.
14. Гаспарский В. Праксеологический анализ проектно-конструкторских работ/Под ред. А. И. Половинкина. М.: Мир, 1978. 222 с.
15. Гмошинский В. Г., Флиорент Г. И. Теоретические основы инженерного прогнозирования. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973. 304 с.
16. Горелик А. Л., Спиркин В. А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1977. 222 с.
17. Грувер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства. М.: Мир, 1987. 528 с.
18. Дабагян А. В. Оптимальное проектирование машин и сложных устройств. М.: Машиностроение, 1979. 280 с.
19. Дворянkin А. М., Половинкин А. И., Соболев А. Н. Методы синтеза технических решений. М.: Наука, 1977. 104 с.
20. Джонс Дж. К. Методы проектирования. М.: Мир, 1986. 322 с.
21. Диксон Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ и принятие решений. М.: Мир, 1969. 440 с.
22. Зарилов Р. Х. Машинный поиск вариантов при моделировании творческого процесса. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 232 с.
23. Картавов С. А. Основы рационального проектирования машин. Киев: Государ. изд-во техн. лит. УССР, 1968. 326 с.
24. Козьяков А. В. Технические средства оснащения рабочих мест ИТР в маши-

- ностроении: Каталог — справочник. Л.: Машиностроение, 1987. 288 с.
25. Колмогоров А. Н., Драгалин А. Г. Введение в математическую логику. М.: Изд-во МГУ, 1982. 120 с.
26. Коршунов А. М., Мантатов В. В. Теория отражения и эвристическая роль знаков. М.: МГУ, 1974. 214 с.
27. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норенков И. П. Теоретические основы САПР: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
28. Крицкий Н. А., Миронов Г. А., Фролов Г. Д. Программирование и алгоритмические языки. М.: Наука, 1979. 509 с.
29. Лисичкин В. А. Теория и практика прогностики. М.: Наука, 1972. 224 с.
30. Методические указания. САПР. Типовые функциональные схемы проектирования изделий. Общие положения. РД 50—631—87. М.: Изд-во стандартов, 1987. 28 с.
31. Михалевич В. С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 286 с.
32. Мюллер И. Эвристические методы в инженерных разработках. М.: Радио и связь, 1984. 132 с.
33. Напалков А. В., Прагина Л. Л. Мозг человека и искусственный интеллект. М.: Изд-во МГУ, 1985. 120 с.
34. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем: Учеб. пособие для вузов — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 304 с.
35. Орлов П. И. Основы конструирования. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.
36. Очерки истории техники в России (коллектив авторов). М.: Наука, 1978. 385 с.
37. Пензов Ю. Е. Элементы математической логики и теории множеств. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1968. 230 с.
38. Петренко А. И. Основы автоматизации проектирования. Киев: Техника, 1982. 295 с.
39. Построение современных систем автоматизированного проектирования/Под ред. К. Д. Жука. Киев: Наук. думка, 1983. 247 с.
40. Принс М. Д. Машинная графика и автоматизация проектирования. М.: Сов. радио, 1975. 230 с.
41. Прохоров А. Ф. Конструктор и ЭВМ. М.: Машиностроение, 1987. 272 с.
42. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ/Под ред. Е. Ю. Малиновского. М.: Машиностроение, 1980. 216 с.
43. САПР. Общие принципы разработки математических моделей объектов проектирования (методические рекомендации). М.: ВНИИНмаш, 1980. 120 с.
44. САПР. Типовые математические модели объектов проектирования в машиностроении (методические указания) РД 50—464—84. М.: Изд-во стандартов, 1985. 200 с.
45. САПР за рубежом. ЭИ серия ТС-3 «Автоматизированные системы управления». М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1985. Вып. 1—2. 27 с.
46. САПР за рубежом. ЭИ серия ТС-3 «Автоматизированные системы управления». М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1984. Вып. 12. 28 с.
47. САПР изделий и технологических процессов в машиностроении/Р. А. Аллик, В. И. Бородинский, А. Г. Бурин и др.; Под общ. ред. Р. А. Аллика. Л.: Машиностроение, 1986. 319 с.
48. Сердюк В. А. Инструментальный диалоговый монитор САПР: Учеб. пособие. М.: МАИ, 1983. 55 с.
49. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
50. Сомов Ю. С. Композиция в технике. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
51. Таленс Я. Ф. Работа конструктора. Л.: Машиностроение, 1987. 255 с.
52. Творчество в научном познании/Под ред. Д. И. Широкова. Минск: Наука и техника, 1976. 250 с.
53. Теория прогнозирования и принятия решений: Учеб. пособие/Под ред. С. А. Саркисяна. М.: Высшая школа, 1977. 351 с.

54. Теория и методы автоматизации проектирования вычислительных систем/ Под ред. М. Брейера. М.: Мир, 1977. 282 с.
55. Фролов К. В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
56. Хазов Б. Ф., Дарусев Б. А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
57. Ханзен Ф. Основы общей методики конструирования. Л.: Машиностроение, 1969. 164 с.
58. Хилл П. Наука и искусство проектирования. М.: Мир, 1973. 270 с.
59. Холл А. Опыт методологии для системотехники. М.: Сов. радио, 1978. 448 с.
60. Чернов Л. Б. Основы методологии проектирования машин. М.: Машиностроение, 1978. 148 с.
61. Экономика машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов/Е. М. Карлик, К. М. Великанов, В. Ф. Власов, А. П. Градов и др.; Под общ. ред. Е. М. Карлика. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1985. 392 с.
62. Cland und Elend der Konstructions-Computer//Idee. — 1983. — N 10. — S. 18—20, 27—32.
63. Desingn Thory for CAD/CAM Integration H. Yoshikawa (2), University of Tokyo Submitted by K. Vehere (1)//Annals of the CIRP. — Vol. 34/1/. — 1985.
64. Kaidu Sigeo «Kikai to kogu, Joob end», 1983, 27. N 10. P. 64.
65. Neue Arbeitstechniken beim Konstruieren. Beits W//VDJ-Ber. — 1983. — N 492. — S. 49—57.
66. Van der Kroonenberg. Vantekenkamer automatisering naar computergesteund ontwerpen. Polgtechnisch tijdschrift ser Werktuigboum. Nederland, 1983. P. 320.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Глава 1. Современное воззрение на процесс и объект проектирования	6
1.1. Становление науки о проектировании	—
1.2. Обзор исследований в области методологии проектирования	10
1.3. Проектирование и искусственный интеллект	24
1.4. Анализ существующих в машиностроении систем автоматизированного проектирования	31
Глава 2. Основы методики проектирования	43
2.1. Проектирование с позиций теории познания	—
2.2. Понятия и принципы методологии проектирования	50
2.3. Процедурная модель проектирования	54
2.4. Математические модели объекта проектирования	59
Глава 3. Процедуры на этапе разработки технического задания	64
3.1. Основные задачи, решаемые на этапе разработки технического задания	—
3.2. Определение потребности в проектировании	65
3.3. Выбор целей проектирования	71
3.4. Определение основных признаков объекта проектирования	97
3.5. Составление технического задания с помощью ЭВМ	111
Глава 4. Процедуры на этапе разработки технического предложения	117
4.1. Основные задачи, решаемые на этапе разработки технического предложения	—
4.2. Поиск вариантов технических решений как творческий процесс	—
4.3. Организация поиска технических решений	120
4.4. Поиск технических решений с помощью ЭВМ	131
4.5. Выбор оптимального варианта технических решений	159
4.6. Анализ принятого варианта технических решений	174
4.7. Имитационное моделирование для анализа объектов проектирования	186
Глава 5. Процедуры на этапе разработки эскизного проекта	206
5.1. Основные задачи, решаемые на этапе разработки эскизного проекта	—
5.2. Выбор параметров объекта проектирования. Постановка задачи	207
5.3. Выбор параметров машин внутри параметрического ряда	208
5.4. Выбор параметров машин, не имеющих аналогов	210
5.5. Компоновка объекта проектирования на стадии эскизного проекта	219
Глава 6. Процедуры на этапе разработки технического проекта	221
6.1. Основные задачи, решаемые на этапе разработки технического проекта	—

6.2. Конструирование объекта проектирования	222
6.3. Выполнение технического проекта с использованием ЭВМ	232
Глава 7 Организация разработки и внедрения САПР	235
7.1. Организация программного обеспечения САПР	—
7.2. Методика проектирования на основе САПР	239
7.3. Рекомендации к разработке и внедрению САПР	245
Список литературы	251

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Быков Владислав Павлович

**МЕТОДИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Редактор *Н. В. Сергеева*
Переплет художника *Н. И. Абрамова*
Художественный редактор *С. С. Венедиктов*
Технический редактор *Т. М. Жилич*
Корректор *З. С. Романова*

ИБ № 5439

Сдано в набор 15.02.88. Подписано в печать 07.08.89. М-33730. Формат 60×90¹/₁₆.
Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,0.
Усл. кр.-отт. 16,0. Уч.-изд. л. 17,27. Тираж 18 000 экз. Заказ 618. Цена 1 р. 20 к.

Ленинградское отделение ордена Трудового Красного Знамени
издательства «Машиностроение». 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10.

Типография № 6 издательства «Машиностроение» при Государственном комитете
СССР по печати. 193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

