

В.В. БЫКОВ, В.П. БЫКОВ

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.В. БЫКОВ, В.П. БЫКОВ

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2011

УДК 658-512.011.56.005:621

ББК 30.2-5-05

Б95

Рецензент:

д.т.н. **Урушев С.В.**

Быков В.В., Быков В.П.

Б95 Исследовательское проектирование в машиностроении. М.:
Машиностроение, 2011. 256 с.

ISBN 978-5-94275-587-4

Представлен программно-методический комплекс для поддержки ранних стадий проектирования в машиностроении. Комплекс показывает возможность автоматизации ранних стадий проектирования; он построен с расчетом на создание гибкого автоматизированного конструкторского бюро (ГАКОБ), способного быстро перенастраиваться на проектирование нового для проектной организации класса технических объектов.

Для специалистов и конструкторов всех отраслей промышленности, полезна студентам и преподавателям вузов.

УДК 658-512.011.56.005:621

ББК 30.2-5-05

ISBN 978-5-94275-587-4

© Издательство «Машиностроение», 2011

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Современное воззрение на процесс и объект проектирования ..	8
1.1. История развития проектирования	8
1.2. Исследования в области методологии проектирования	13
1.3. Проектирование и искусственный интеллект	15
1.4. Машина как система	20
Глава 2. Основы методологии проектирования машин	23
2.1. Проектирование с позиций теории познания	23
2.2. Формальное описание процесса проектирования	33
2.3. Процедурная модель проектирования	36
2.4. Формы описаний объекта проектирования	40
2.5. Оптимизация в процедурах проектирования	47
2.6. Автоматизация проектирования	53
Глава 3. Процедуры на стадии технического задания	60
3.1. Техническое задание в распознавании объекта проектирования	60
3.2. Процедура определения потребности проектирования	63
3.2.1. Содержание процедуры	63
3.2.2. Формальное описание процедуры определения потребности проектирования	64
3.2.3. Автоматизированное выполнение процедуры определения потребности проектирования	65
3.3. Процедура определения целей проектирования	68
3.3.1. Содержание процедуры	68
3.3.2. Формальное описание процедуры определения целей проектирования	72
3.3.3. Автоматизированное выполнение процедуры определения целей проектирования	78
3.4. Процедура определения признаков объекта проектирования	81
3.4.1. Содержание процедуры	81
3.4.2. Формальное описание процедуры определения признаков объекта проектирования	85
3.4.3. Автоматизированное выполнение процедуры выбора признаков объекта проектирования	87
3.5. Основы инженерного прогнозирования	90

Глава 4. Процедуры на стадии технического предложения	100
4.1. Поиск вариантов технического решения	100
4.2. Автоматизированный поиск технических решений	110
4.3. Принятие решения	122
4.4. Автоматизированное выполнение процедуры принятия решения	129
4.5. Анализ принятого решения	133
4.6. Имитационное моделирование для анализа объектов проектирования	144
4.7. Функционально-стоимостной анализ	155
4.8. Автоматизированное выполнение процедуры анализа принятого решения	161
Глава 5. Процедуры на стадии эскизного проекта	176
5.1. Основные задачи, решаемые на стадии эскизного проекта	176
5.2. Выбор параметров объекта проектирования.	
Постановка задачи	177
5.2.1. Выбор параметров машин внутри параметрического ряда	178
5.2.2. Выбор параметров машин, не имеющих аналогов	180
5.3. Программные средства для оптимизации параметров	191
5.4. Компонировка объекта проектирования на стадии эскизного проекта	192
Глава 6. Процедуры на стадиях разработки технического проекта и рабочей документации	195
6.1. Основные задачи, решаемые на этапе технического проекта и рабочей документации	195
6.2. Конструирование объекта проектирования	196
6.3. Системы автоматизированного проектирования	209
6.4. Расчет методом конечных элементов	220
6.5. Интегрированная система автоматизации	234
6.6. CALS-технологии	239
6.7. Стратегии реализации PLM систем на предприятии	249
Список литературы	253

ВВЕДЕНИЕ

В основу методического обеспечения систем автоматизированного проектирования (САПР) положен многолетний опыт проектирования, закрепленный в Единой системе конструкторской документации (ЕСКД). Именно ЕСКД отражает логику процесса проектирования, его стадийность, связанную с последовательным извлечением информации о будущем объекте из непосредственного и косвенного его окружения. Содержащиеся в ГОСТах ЕСКД описания стадий проектирования позволили выделить основные процедуры проектирования и задачи, решаемые при их выполнении.

В последние годы весьма часто упоминается необходимость создания наукоемких изделий машиностроения. Такого рода изделия могут создаваться на основе исследовательского проектирования, включающего научные знания во все его процедуры. На научной основе должен быть определен и весь ход проектирования.

Все процедуры связаны с поиском оптимальных решений, а критерии оптимальности определяются поставленными целями проектирования. Последовательное извлечение информации об объекте, исходя из целей проектирования, есть по существу *распознавание*. В этом случае распознается не то, что существует, а то, что должно существовать для наилучшего удовлетворения определенной потребности.

В этом издании методики выполнения ранних стадий проектирования используют нечеткие математические модели. Кроме того, в нем представлен вариант программной поддержки их выполнения.

До настоящего времени системы, охватывающей все стадии проектирования от технического задания до рабочей документации, еще не создано.

Авторы исходят из следующих концепций:

- процесс проектирования — одна из разновидностей трудовой деятельности с отсроченным исполнением, основные закономерности которой уже вскрыты;
- при любом уровне автоматизации проектирования человек (конструктор) всегда будет основным элементом системы, за ним останется окончательный выбор проектных решений;
- форма проектной документации при использовании САПР со временем претерпит существенные изменения, однако стадийность проектирования, проявляющаяся в последовательной разработке тех-

нического задания, технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, рабочей документации, отвечающая диалектике процесса распознавания объекта проектирования в среде его окружения, стратификации его описания, остается незыблемой.

В книге представлен программно-методический комплекс для поддержки ранних стадий проектирования в машиностроении, воплощающий предложенную методику их выполнения. Комплекс не претендует на права товарного продукта. Он лишь показывает возможность автоматизации ранних стадий проектирования. Более того, он построен с расчетом на создание гибкого автоматизированного конструкторского бюро (ГАКОБ), способного быстро перенастраиваться на проектирование нового для проектной организации класса технических объектов.

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.

Структурно разделы, относящиеся к ранним стадиям проектирования, состоят из трех частей. Первая рассматривает затронутые вопросы неформально с позиций здравого смысла, вторая формализует возникающие задачи, а третья показывает возможность автоматизации их решения.

В предлагаемой читателю книге понятие проектирование охватывает весь процесс разработки изделия от зарождения идеи до рабочей документации. Конструирование рассматривается составной частью проектирования, начинающееся с момента воплощения в конструкцию принятого решения. Этому соответствует стадия эскизного проекта.

Среди отечественных исследователей проектирования назовем: А.И. Половинкина [1], А.Н. Борисова [24], А.Ф. Крайнева [29], Р.И. Сольничева [40]. Из иностранных исследователей в нашей стране широко известны: Ф. Ханзен [43], П. Хилл [44], Дж.К. Джонс [19], А. Холл [45], Дж. Диксон [20], В. Гаспарский [14], М.Д. Принс [36], К. Рот [37], В. Хубка [46].

Авторы книги стремились обобщить современные знания, добытые многими исследователями и ими самими в области методологии проектирования. Фундаментом этих знаний стал подход к проектированию как к распознаванию объекта, распознаванию, сопровождающемуся добычей информации из сфер непосредственного и косвенного окружения будущего объекта: научно-технической, социальной, экономической, природной (производственной) среды. Лейтмотивом

всего процесса проектирования выступают его цели. Именно они определяют и признаки (свойства) объекта и его варианты. Они же формируют критерии для выбора оптимального варианта.

Авторам хотелось показать возможность автоматизированного выполнения процедур на всех стадиях проектирования от технического задания до рабочей документации, создать предпосылки Гибкого автоматизированного конструкторского бюро (ГАКОБ), способного перенастраиваться на разработку объектов в различных областях техники.

Остовом ГАКОБ авторы считают инвариантную относительно объектов операционную среду, поддерживающую все стадии проектирования. Объектно-ориентированные знания формируются на внешних носителях. Вводя те или иные знания в операционную среду, пользователь получает возможность проектировать объекты в соответствующей области техники. Знания на внешних носителях формируют и формализуют инженеры по знаниям, получая их от экспертов.

Глава 1

СОВРЕМЕННОЕ ВОЗЗРЕНИЕ НА ПРОЦЕСС И ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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, текстового или графического описания.

До появления письменности формами проектирования и конструирования были устные советы и модель. Начало использования чертежей на Руси относят к XI веку. 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. 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 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.

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 одинакие, 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 отзывы о ней современников. Восторгаясь, они отмечали «ужасающее» 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. Чиждова «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) по-

иск 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 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. В 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.

В фундаментальных исследованиях 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 ки-

нематических схем механизмов, воспроизводящих требуемый закон движения. При этом учитываются вопросы второго и третьего этапов: коэффициент полезного действия, возможность изготовления и 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 конце XX, начале XXI вв. 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 (в среднем по всем отраслям техники число подсистем и элементов в ТС удваивается через каждые 15 лет [1]). Растет 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 снижает-

ся. 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 XX в. 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 поиску и принятию решения.

Из анализа исследований, относящихся к проектированию, можно установить, что знания о нем условно подразделяются на две дисциплины:

- методология проектирования;
- моделирование объекта проектирования.

Эти дисциплины, как основные подсистемы знаний о проектировании, взаимно связаны, но имеют свои особенности. Методология проектирования занимается методами поиска технических решений, а моделирование объекта связано с его описаниями.

В целом современное проектирование характеризуется применением системного анализа, оптимизации и автоматизации. Системный анализ при проектировании машины рассматривает ее и как систему, содержащую собственные взаимосвязанные элементы, и как элемент системы более высокого уровня, включающей помимо самой машины факторы непосредственного и косвенного ее окружения. Оптимизация сопровождает все процедуры проектирования при поиске технических решений, автоматизация сокращает срок проектирования и повышает качество создаваемых объектов.

В России широкое применение САПР началось в 80-х гг. XX в. На предприятиях и проектных организациях создавались отделы и лаборатории САПР, приобретались дорогостоящая техника и программные средства. Первым этапом внедрения САПР было выполнение различного рода расчетов. Там, где объем их был велик, применение САПР приносило положительный эффект. И наоборот, в тех отраслях, где объем расчетов был невелик, затраты на внедрение САПР не окупались. В то время конструкторы в своем большинстве еще не владели компьютерной техникой.

Новый этап внедрения САПР начался в середине 90-х гг., когда в нашей стране появились персональные компьютеры, а в проектные организации стали приходить молодые специалисты, владеющие вычислительной техникой. К этому моменту уже имелись графические редакторы, поддерживающие чертежные работы. Наибольшее распространение в нашей стране получил AutoCAD — удобный, компактный и интуитивно понятный программный продукт с хорошим соотношением цена — качество. На крупных предприятиях в конце прошлого столетия стали применять мощные интегрированные программные комплексы CATIA, Unigraphics, Pro/Engineer, охватывающие проектирование, подготовку производства, управление производством.

В настоящее время автоматизированное проектирование в той или иной мере вошло в практику всех проектных организаций. Более того, оно постепенно входит в информационную поддержку всего жизненного цикла продукции. Текстовые и графические редакторы, программы для выполнения проективных и поверочных расчетов стали привычным инструментом для конструирования машин и только ранние стадии проектирования — техническое задание и техническое предложение еще не получили программной поддержки. Причина этого главным образом заключается в недостаточной развитости методологии проектирования.

1.2. ИССЛЕДОВАНИЯ 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 и 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 г. Для проектирования самых разнообразных машин и сооружений (инженерных, гражданских, сельскохозяйственных, дорожных и пр.), 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 аудиторий театров и концертных залов необходимо знать акустику и музыку, для постройки конюшни для лошадей или хлева для свиней — нравы этих животных и т.д.

Для решения многих вопросов проектирования, методологии проектирования, автоматизированного проектирования, методик обучения проектированию в начале восьмидесятых годов прошлого века было организовано Международное общество технического проектирования, ставшее организатором международных конференций ICED (International Conference on Engineering Designee). Инициатором создания общества стал профессор Цюрихского политехнического института В. Хубка. Первая конференция прошла в 1981 г. в Риме. В 2001 г. Международное общество технического проектирования было преобразовано в Дизайн Общество (DS).

Дизайн Общество является неправительственной некоммерческой организацией, существующей за счет благотворительности, стремя-

щейся внести свой вклад во все аспекты проектирования и содействовать внедрению достигнутых знаний на благо всего человечества. В рамках этого общества созданы группы по интересам:

- прикладные науки инженерного проектирования;
- вычислительный синтез в проектировании;
- принятие решений;
- творчество в проектировании;
- проектирование в образовании;
- теория проектирования;
- мехатроника;
- экодизайн;
- поведение человека в проектировании;
- управление структурной сложности;
- моделирование и управление технологических процессов.

Группа «Теория проектирования» в качестве первой своей повестки дня в рамках конференции ICED 07 поставила вопросы:

- теория проектирования и математика. Задача изучить отношение старых и новых теорий проектирования с последними достижениями в области математики;
- теория проектирования и новые подходы к гибкой структуре знаний. Инженерные науки все больше и больше основаны на поиске интеграции знаний, направленных на теорию проектирования.

Авторы книги приняли участие в программе конференции ICED 93 с докладом: «The basic of a methodology of designing technical objects».

1.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Создание искусственного интеллекта связано с разработкой кибернетических моделей интеллектуальной деятельности.

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 соз-

нательная 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 методикам: 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 эвристическим программам.

Все процедуры по области их использования можно разделить на специальные, общетехнические и применяемые в любой области человеческой деятельности. Третий тип процедур по содержанию можно отнести к метапроцедурам, играющим немаловажную роль при создании систем искусственного интеллекта. Декомпозиция 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. «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, в частном случае совпадающий с целевым. На множестве объектов введено понятие различия, образующее множество $\{r_1, r_2, \dots, r_q\}$. Для каждой пары объектов (x_i, x_k) 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, характеризуемой 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» [22]. 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 [23], 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.

Одним из направлений искусственного интеллекта стали экспертные системы (ЭС). ЭС — это программный комплекс, способный решать задачи обычно в узкой предметной области на уровне эксперта. Развиваясь вначале главным образом в медицине для диагностики заболеваний, а также в геологии для поиска полезных ископаемых, ЭС в настоящее время проникают во все области знаний, в том числе и в проектирование.

Структурно ЭС представляет собой комплекс условно называемых аппаратных средств (рис. 1.1).

Эксперт — это специалист высокого класса в конкретной предметной области знаний. Механизм приобретения знаний представляет собой аппарат, позволяющий формализовать знания, полученные от эксперта. База знаний содержит в формализованном виде определенные знания. К знаниям относят правила, теории, гипотезы, факты, эвристические приемы, законы и многое другое, что связано с конкретной предметной областью знаний. База данных (БД) включает определенные константы: ГОСТ, нормативы, сведения об элементной базе рассматриваемых в ЭС систем. В ЭС для проектирования в области машиностроения это могут быть детали машин и вообще данные, которые в традиционном проектировании содержатся в справочниках. Механизм вывода представляет собой аппарат, предназначенный для

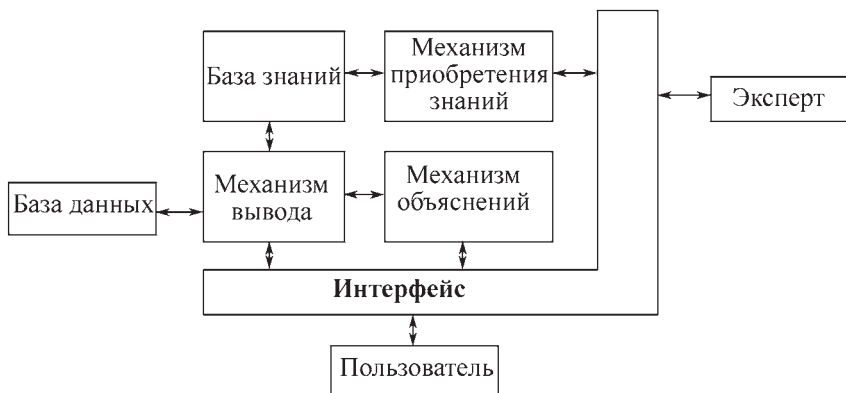


Рис. 1.1. Структурная схема экспертной системы

принятия того или иного решения в ответ на запрос пользователя. Действие этого механизма зависит от способа представления знаний. Механизм объяснений — неотъемлемый атрибут ЭС. Он должен быть в состоянии дать пояснения пользователю в ответ на его запрос — почему принято такое-то решение? Интерфейс обеспечивает диалог пользователя с ЭС.

Искусственный интеллект как научное направление стремится создать искусственное существо — агента, способного частично или полностью заменить человека в творческой его деятельности. Такого рода стремление побуждает необходимость изучения наиболее общих закономерностей взаимосвязи и взаимодействия агента с окружающей его средой, поиска и принятия решений. Достижения искусственного интеллекта в связи с этим полезны не только для создания агента, но и для создания методик обучения человека, в частности, методик проектирования.

В настоящее время часто упоминается распределенный искусственный интеллект (РИИ). Под этим подразумевается взаимодействие отдельных интеллектуальных систем, каждая из которых в виде автономного модуля предназначена для решения определенных задач. К РИИ относятся мультиагентные системы (МАС) [22]. Агент в искусственном интеллекте — активный объект обеспечивающий решение определенной задачи и взаимодействующий с другими агентами. Мультиагентная система может включать как чисто искусственных агентов (программные модули), так и человека. При использовании МАС со-

крашаются сроки решения задач за счет параллелизма, повышается гибкость и надежность соответственно за счет привлечения агентов различной мощности и передачи решающих функций от одних агентов, оказавшихся не способными решить задачу, другим.

1.4. МАШИНА КАК СИСТЕМА

Любая машина представляет собой систему, состоящую из взаимосвязанных подсистем и элементов и оказывающуюся под влиянием ряда факторов непосредственного и косвенного окружения.

Основные подсистемы и факторы окружения представлены на рис. 1.2.

К непосредственному окружению относится производственная и природная среда. Все остальные виды окружения: экономическая ситуация, социальные требования, научно-техническая ситуация — косвенные. Только учет взаимовлияния подсистем машины и воздействия на нее факторов окружения может обеспечить успех в ее создании.

Под качеством машины подразумевается совокупность ее свойств, определяющих способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

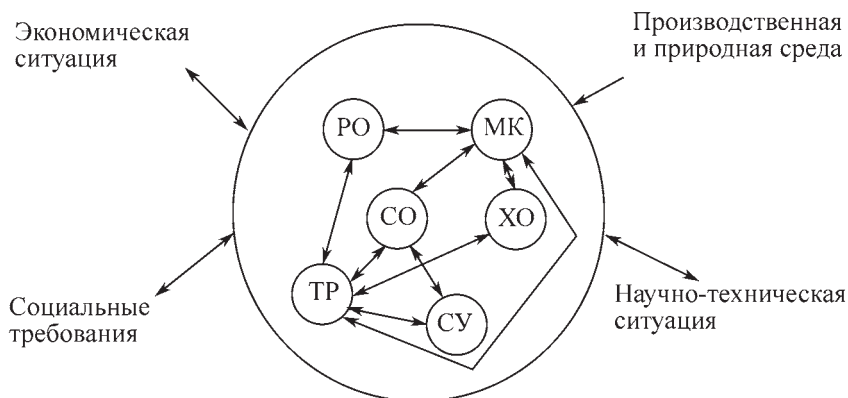


Рис. 1.2. Машина как система:

CO — силовое оборудование; TP — трансмиссия; PO — рабочее оборудование; MK — металлоконструкция; XO — ходовое оборудование; CY — система управления

Качество оценивается показателями, которые могут быть единичными и комплексными. Единичный показатель характеризует какое-либо одно свойство машины, комплексный — совокупность свойств. Примерами единичных показателей могут служить: производительность машины, ее масса, уровень шума в кабине оператора, обзорность из кабины управления и др. Пример комплексного показателя — надежность, включающая ряд показателей, относящихся к долговечности, безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости. В общем случае комплексный показатель имеет выражение:

$$K = c_1d_1 + c_2d_2 + \dots + c_nd_n,$$

где K — комплексный показатель; $c_1, c_2, \dots, c_n$ — коэффициенты, учитывающие важность единичных показателей; $d_1, d_2, \dots, d_n$ — относительные значения единичных показателей.

Оценка качества любого объекта может быть произведена только на основе сравнения с другим аналогичным образцом. В качестве аналога принимают лучший отечественный или иностранный образец. Значения $d_1, d_2, \dots, d_n$ представляют собой отношение единичных показателей оцениваемого объекта с соответствующими показателями аналога. Если аналога нет, то рассматривают его некоторый виртуальный образ.

Коэффициенты важности единичных показателей устанавливаются в долях единицы, причем вводится нормирующее условие $c_1 + c_2 + \dots + c_n = 1$.

В этих условиях, если $K > 1$, то оцениваемый объект можно считать превосходящим аналог по комплексному показателю, если $K = 1$ — на уровне аналога, при $K < 1$ — оцениваемый объект уступает аналогу.

Факторы, определяющие качество создаваемой машины:

- инженерный — технический уровень и обоснованность заложенных в конструкцию идей, а также количество ошибок в проекте;
- производственный — технический уровень станков, контрольно-измерительных приборов и оборудования на заводе, где происходит изготовление машины;
- снабженческий — качество комплектующих изделий, входящих в состав машины, но приобретаемых от других производителей;
- квалификационный — квалификация инженерно-технических работников и рабочих на предприятии;
- экономический — финансирование мероприятий, направленных на повышение качества машины;
- организационный — состояние технологической дисциплины на предприятии-изготовителе.

Повышение качества машин достигается или совершенствованием существующих образцов, или созданием принципиально новых, воплощающих прогрессивные конструктивные идеи. Оба пути связаны между собой. Первый отражает эволюционное развитие, второй — революционное. Законы развития в технической сфере такие же, как и в природе. С момента возникновения нового вида технических объектов, происшедшего в результате революционного скачка, его дальнейшее развитие идет путем количественных изменений. Однако это может происходить лишь до определенного предела, когда становится невозможным дальнейшее улучшение показателей качества в пределах существующего вида. С этого момента развитие приобретает революционный характер и приводит к появлению нового вида технических объектов, реализующего более прогрессивную технологию.

Подводя итог первой главы, отметим наиболее важные ее выводы.

1. Ученые в прошлом нередко задумывались над тем, как появляются 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, а теория проектирования как наука лишь создается в настоящее время.

2. Основными объектами исследований в теории проектирования являются процедуры и операции этого процесса, их логическая последовательность и методы выполнения.

3. Основными чертами современной методики проектирования оказываются системность и оптимизационность, широкое использование вычислительных методов выполнения проектных процедур и операций.

4. Достижения в области искусственного интеллекта способствуют совершенствованию систем автоматизированного проектирования и методик обучения будущих специалистов.

Глава 2

ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН

2.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ ПОЗНАНИЯ

Для того чтобы знания о проектировании могли составить теорию, они должны дать целостное представление о закономерностях и существенных связях этого процесса. Основные атрибуты теории: система понятий, основополагающая концепция, аксиомы, теоремы.

В самом общем виде под проектированием понимается составление описания еще не существующего объекта. Описание может иметь разные формы. В некоторых случаях оно замыкается внутри человеческого сознания и не имеет внешнего проявления. Тем не менее, любое действие, совершаемое человеком, проектируется в его сознании.

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.

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.

Теоретической основой проектирования является методология, находящаяся пока в стадии становления.

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

сти, а также составление описания, необходимого для его создания в заданных условиях.

Субъект проектирования. Под субъектом проектирования можно понимать отдельного человека, коллектив специалистов, искусственный интеллект (агент). По аналогии с субъектом познания [28] субъект проектирования — система, осуществляющая извлечение информации о внешних явлениях природы и общественной жизни, включая процесс коммуникации в широком смысле слова (передача сведений, обмен мнениями, 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 (ОП). Основная отличительная особенность проектирования от познания вообще состоит в том, что ОП, в отличие от объекта познания, еще не существует, однако его образ воспринимается субъектом как реальный с присущими ему внутренней динамичностью и противоречивостью, с конкретными свойствами. Современные ОП выступают как сложные системы с большим количеством взаимосвязанных подсистем и элементов. ОП 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, — 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.

Познавательный образ. Формирование познавательного образа (субъективной модели) при проектировании называется внутренней активностью субъекта, «скрытой» его деятельностью. Формирование

субъективной модели сопровождает любую трудовую деятельность 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 восприятии информации и ее оценке. 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.

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. Вторая часть трудовой деятельности при проектировании, относящаяся к обслуживанию, состоит в принятии решения, исполнении и контроле. В процессе принятия решения человек манипулирует оперативными моделями, выбирая из них ту, которая в наибольшей степени отвечает реальной ситуации и конкретной задаче.

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 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 самостоя-

тельную 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 нерасчленном 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 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 внешне и бессознательно. Подобное обстоятельство трактовалось представителями идеалистического направления в философии как иррациональное свойство человеческого мышления, как свободная творческая деятельность. Этот ошибочный взгляд был 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 [28]. 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 во 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.

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 осуществляется 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. 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 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 [28]. 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 вызвать 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. 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.

Исследовательское проектирование есть распознавание того, что должно существовать для удовлетворения определенной потребности — вот концепция, рассматриваемая как основополагающая.

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 — конструировании 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. 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 средней 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 завершенную 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.

Кроме этого, искусственный язык должен иметь возможность описания самой последовательности процесса проектирования. Это позволит сохранить знания не только об объекте проектирования, но и о том, как он создавался, позволит оценить процесс проектирования после его завершения, и впоследствии даст возможность воспользоваться этими знаниями с учетом оценок и рекомендаций.

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.

В настоящее время в рамках CALS-технологий для описания промышленных изделий на различных этапах их жизненного цикла используется язык Express. Он отвечает большинству из требований к языку проектирования (сведения о CALS-технологиях и о языке Express представлены в главе 6).

Цель проектирования — ожидаемый результат реализации проекта.

Признак ОП — свойство, характеризующее ОП.

Параметр ОП — количественное выражение признака ОП.

Проектное решение — промежуточное или конечное описание ОП, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего рассмотрения или окончания проектирования.

Алгоритм проектирования — совокупность предписаний, необходимых для выполнения проектирования.

Проектная процедура — совокупность действий, выполнение которых оканчивается проектным решением.

Проектная операция — действие или совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры.

Охарактеризуем особенности современных методов проектирования и вместе с ними основные аксиомы проектирования.

Сложность технических объектов, состоящих из многочисленных по-разному взаимодействующих друг с другом и окружающей средой подсистем, требует системного подхода. 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.

Аксиома 1. Сложность современных объектов определяет 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.

Аксиома 2. Техническое решение объекта проектирования никогда не является единственным хотя бы потому, что всегда как минимум существует два решения: создавать объект и не создавать объект.

Аксиома 3. Ни один из вариантов технического решения не может быть абсолютно совершенным, так как технический прогресс находится в постоянном развитии.

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 методы и алгоритмы выполнения проектных процедур и операций — третью задачу теории. 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. Но невыполнение работ, предусмотренных техническим предложением (выбор различных вариантов возможных решений, сравнительная оценка 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.

2.2. ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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.

Цель проектирования — это то, что нужно обеспечить в ходе и в результате создания объекта. Например: сокращение сроков проектирования, повышение надежности изделия, снижение себестоимости и т.п.

Признак объекта проектирования — название свойства, характеризующего объект, улучшение которого обеспечивает достижение какой-либо цели проектирования. Например, признак заимствования готовых технических решений при его улучшении (увеличении числа заимствованных составных частей объекта) обеспечивает сокращение сроков проектирования. Признак — вероятность безотказной работы при его увеличении обеспечивает повышение надежности. Признак —

Бинарное отношение ϕ между множествами A и P при проектировании означает быть средством к достижению цели, а бинарное отношение между P и X — отвечать признаку. 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 по A_0 :

$$\phi(A_0) = (\subset p)(\exists a)[a \in A_0 \wedge (a, p) \in \phi]. \quad (2.2)$$

В приведенном выражении знак « $\subset$ » означает классификатор, а « $\exists$ » — квантор существования. С учетом этого, выражение (2.2) означает, что срез бинарного отношения ϕ по подмножеству A_0 есть множество таких p (признаков), для которых существует a (цель проектирования) при условии истинности стоящего в квадратных скобках: a принадлежит A_0 и пара (a, p) принадлежит ϕ .

Аналогично найдем:

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

где P_0 — срез множества P по подмножеству A_0 .

Произведение бинарных отношений

$$\psi \circ \phi = (\subset (a, x))(\exists p)[(a, p) \in \phi \wedge (p, x) \in \psi] \quad (2.4)$$

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:

$$\psi \circ \phi(A_0) = (\subset (a, x))(\exists p)[(a, p) \in \phi \wedge (p, x) \in \psi \wedge a \in A_0]. \quad (2.5)$$

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

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

$$[F : (\psi \circ \phi(A_0)) \rightarrow V] \rightarrow \text{opt.}$$

2.3. ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Логическая схема исследовательского проектирования представлена процедурной моделью. Она отражает системный подход к этому процессу и является результатом обобщения ранее выполненных исследований в области методологии проектирования и реализации основной концепции. В основе ее лежат этапы, характерные для трудовой деятельности с отсроченной реализацией. Модель дает наглядное представление об основных процедурах проектирования, задачах и методах их решения, указывает на источники информации. Модель согласуется со стадиями разработки согласно ЕСКД, а выпуск тех или иных видов технической документации представлен как результат соответствующих проектных процедур (рис. 2.2).

Проектирование начинается с определения потребности в создании нового изделия. Потребность в нем чаще всего диктуется состоянием производства и 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. Значительно чаще не удастся 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. На предприятиях, специализирующихся на выпуске определенной продукции потребность проектирования определяется необходимостью постоянного ее совершенствования.

Определение цели 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 в его окружении. 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 и его окружения. Весьма удобный аппарат для анализа и синтеза информации представляет инженерное прогнозирование.

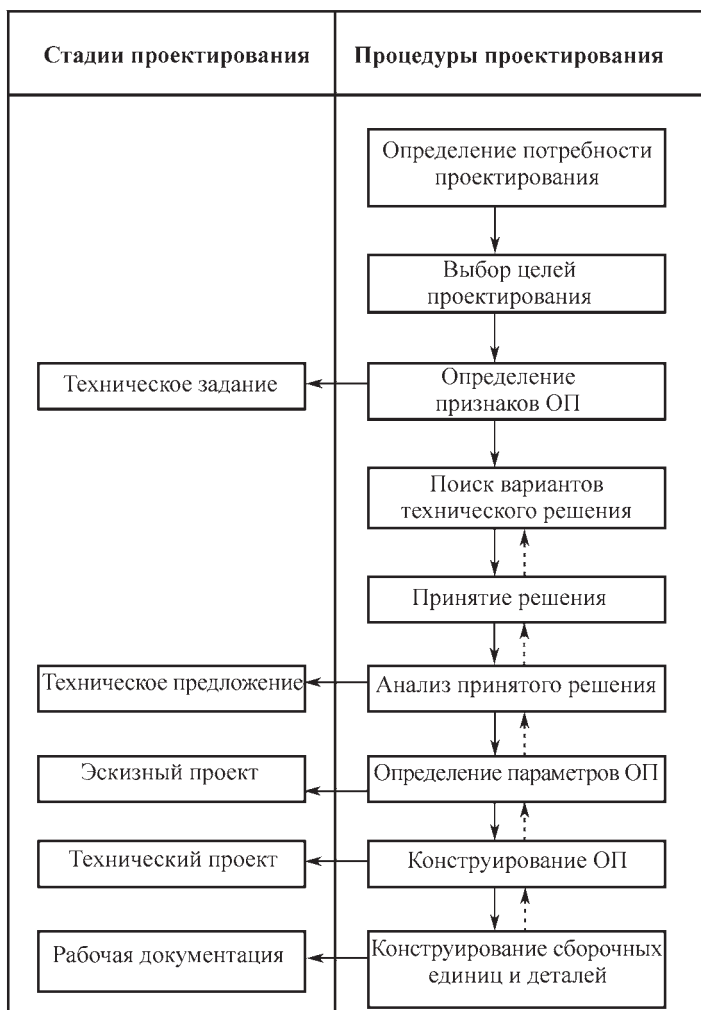


Рис. 2.2. Процедурная модель проектирования

Оно способно 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 и,

кроме того, когда можно ожидать внедрение в производство отдельных технических решений и целых направлений. Выбирая, например, тот или иной способ воздействия на среду как основу для создания новой машины, конструктор должен помнить, что на проектирование и внедрение в серийное производство его разработки уйдет не менее 5 лет. 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 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 включается 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 [1], используя техническую литературу, 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 поставленным целям. Принятие решения уже сейчас формализовано в значительно большей степени, чем предыдущая процедура, хотя и содержит ряд задач, решаемых эвристическим методом. Для сравнения вариантов, не содержащих параметрическую информацию, можно применить матрицу решений [44] и Генеральную определительную таблицу [16]. На окончательном этапе принятия решения используется экономический расчет.

Основным источником информации для сравнения вариантов служат опыт использования существующих однотипных изделий. Весьма полезную информацию для выполнения процедуры несет 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 пунктирной стрелкой (см. рис. 2.2). Окончательным оформлением принятого решения является техническое предложение.

Любое, даже самое передовое техническое решение, окажется бесплодным, если не получит удачного технического воплощения с позиций надежности, технологичности, эргономичности, эстетичности. Современная машина выступает как единый комплекс, отдельные узлы которого находятся во взаимодействии. Так, например, вибрационное действие 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, и особенно условия работы оператора. 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 закона диалектики — закона единства и борьбы противоположностей. Выбор параметров можно отнести к классу задач, которые носят название экстремальных. Тот или иной, один или несколько критериев качества, улучшение которых составляют цель проектирования, представляются в виде функций, подлежащих максимизации или минимизации. Аргументами функций служат параметры машины, допустимые значения которых ограничены некоторой областью. Решить поставленную задачу — значит найти такие параметры, при которых целевые функции получают 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 за-

висит как от опыта конструктора, так и от его умения использовать знания, достигнутые целым рядом наук, занимающихся деталями машин, взаимозаменяемостью, стандартизацией, техническими измерениями, надежностью, эргономикой, технологией обработки конструкционных материалов, технической эстетикой, квалитметрией, охраной труда, экологией и др. 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 над 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 этой связи весьма большое значение имеет форма описания. Она должна быть наглядной и информативной.

Хотя в практике проектирования не всегда выполняются все стадии, процедуры проектирования, представленные на схеме модели, сопровождают любое проектирование, будь это разработка отдельной детали, узла или целого комплекса. Даже при разработке детали необходимо задумываться о ее целевом назначении, признаках (свойствах), отвечающих назначению, вырабатывать варианты конструктивного решения, выбирать из них лучший, анализировать, определять параметры, конструктивно прорабатывать. При сокращенной стадийности, как правило, выполняют техническое задание, технический проект и рабочую документацию. При этом процедуры, относящиеся к техническому предложению и эскизному проекту, относят к техническому заданию и техническому проекту.

2.4. ФОРМЫ ОПИСАНИЙ 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 объекта и параметров. В этой связи описание ОП можно назвать стратифицированным [24], развивающимися от «сжатого» на этапах верхнего уровня процедурной модели до развернутого на нижних уровнях.

Для использования ЭВМ описание объекта проектирования должно носить характер математических моделей.

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

$$O_0 = O\tilde{P}_1 \Rightarrow O\tilde{P}_2 \Rightarrow \dots \Rightarrow O\tilde{P}_6 \Rightarrow O\tilde{P}_7,$$

где O_0 — означает процесс проектирования; $O\tilde{P}_1, O\tilde{P}_2, \dots, O\tilde{P}_7$ — описание объекта проектирования на разных этапах его разработки.

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

$$O\tilde{P}_1 = A_0 = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}.$$

Описание ОП, 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:

$$O\tilde{P}_2 = \{A_0, P_i\}.$$

Целевое и концептуальное описание составляет техническое задание.

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

$$O\tilde{P}_3 = \{P_c, H\}.$$

Для функционального описания объекта проектирования предлагается использовать функциональную систематику [5]. В технике она охватывает все множество объектов и процессов материального производства, экологии и непроизводительной сферы. Каждый материальный объект предназначен выполнять определенную служебную функцию при заданной норме совместимости с факторами внешней среды. Функциональная систематика базируется на концепции функциональных воздействий, которые проявляются при реализации целей функционирования. Структура функциональных систем представлена на рис. 2.3.

Группы объектов, связанных между собой той или иной степенью общности их признаков (таксоны), объединяются в архетипы, метатипы, надтипы, типы, классы, виды. Каждый таксон имеет свою под-

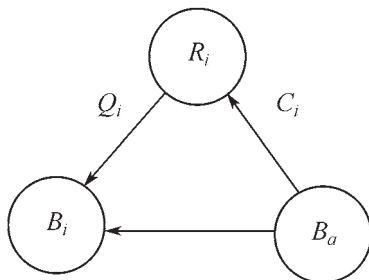
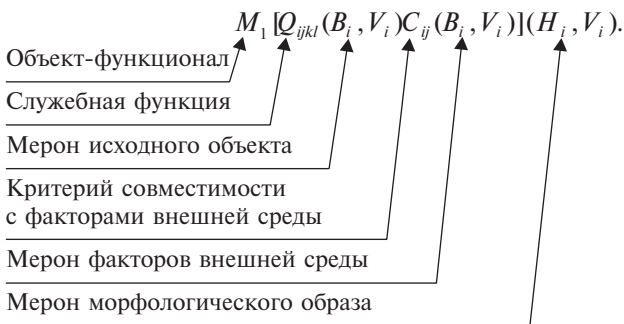


Рис. 2.3. Структура функциональных систем:

R_i — объекты-функционалы; B_i — исходные объекты; B_a — объекты — факторы внешней среды; Q_i — служебные функции; C_i — критерии совместимости с объектами — факторами внешней среды

группу. Для обозначения таксона используются функциональные формулы. Например, функциональная формула подвида:



Для функционального анализа и моделирования может быть использована методология *IDEFO* [22]. Основным принцип, заложенный в эту методологию, заключается в пошаговой нисходящей декомпозиции абстрактного представления проектируемой системы. Функциональная модель строится с использованием языка функционального моделирования (ЯФМ). Основной графический элемент ЯФМ — блок в виде прямоугольника, обозначающего функцию ОП. Связи функций отображаются стрелками. Каждая функция имеет входы, выходы, управление и механизмы. Входы представляют то, что необходимо для выполнения функции, выходы — то, что оказывается результатом выполнения функции, управление описывает условия, оказывающие

влияние на выполнение функции, механизмы означают средства (материальные, энергетические или информационные) для выполнения функции. Каждая функция может быть разбита на подфункции, отображаемые на нижележащих уровнях иерархии. Блоки нумеруются. Номера проставляются в правом нижнем углу прямоугольника. Название функции, вписываемое в прямоугольник, включает указание действия в виде глагола или отглагольного существительного и объект, на который направлено действие.

Для иллюстрации рассмотрим пример функциональной модели водометного движителя (рис. 2.4) [22].

Математические модели, относящиеся к структурному описанию, включают множество элементов, составляющих систему E , множество признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла P_ξ , множество связей между всеми элементами системы Q :

$$O\tilde{P}_4 = \{E, P_\xi, Q\}.$$

Формами представления структурного описания могут быть: принципиальные и кинематические схемы. Наиболее общее структурное описание представляется в виде орграфа, на котором вершины обозначают элементы, а дуги — их взаимосвязи.

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

$$O\tilde{P}_5 = \{P_c, T, F\}.$$

Динамические модели чаще всего представляются дифференциальными уравнениями. Здесь могут быть использованы эквивалентные схемы.

Описание, определяющее параметры объекта, назовем параметрическим:

$$O\tilde{P}_6 = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m\}.$$

Описание $O\tilde{P}_7$, дающее наиболее наглядное представление об объекте, назовем геометрическим. Оно выполняется средствами геометрического моделирования.

Специфика выполняемых процедур проявляется, прежде всего, в математических моделях объектов проектирования.



a — функциональная модель; b — функциональная декомпозиция;
PT0—PT4 — различные состояния рабочего тела

В общем виде математические модели можно распределить по уровням [34]. На микроуровне используются дифференциальные уравнения в частных производных с краевыми условиями. Так, например, описывается прочность машиностроительных деталей. На макроуровне применяются алгебраические и обыкновенные дифференциальные уравнения, например, для описания процессов, проходящих в механических системах. В математических моделях на метаяуровне, представляющих описание сложных систем, чаще всего используют аппарат теории массового обслуживания.

Особую группу составляют нечеткие математические модели для представления информации в условиях многочисленных «не» факторов: нечеткость, неполнота информации, неопределенность, недоопределенность и т.п. С такой информацией приходится иметь дело на ранних стадиях проектирования. К нечетким математическим моделям относятся [31]: нечеткие высказывания, нечеткие множества, нечеткие отношения, нечеткие переменные, лингвистические переменные.

Нечеткими называются высказывания, имеющие в отличие от высказываний в математической логике некоторую степень истинности, принимающее значение в замкнутом интервале $[0; 1]$. В этом интервале предельные значения «0» и «1» относятся к четким высказываниям, имеющим истинность *False* (*ложь*) и *True* (*истина*) соответственно.

Например, высказывание: «Объекта проектирования нет в нашей стране». Допустим под объектом проектирования подразумевается машина для выполнения какого-либо технологического процесса. Если рассматривать приведенное высказывание как четкое не позволяет недостаточность информации, то его следует отнести к нечетким с определенной степенью истинности, например равной 0,9.

При значении истинности больше 0,5 — нечеткое высказывание скорее истинно, нежели ложно; при значении меньше 0,5 — скорее ложно, чем истинно; при значении 0,5 — высказывание индифферентно к истинности (не ложно и не истинно). Нечеткие высказывания чаще всего обозначаются прописной буквой с тильдой, например $\tilde{A}$, а степень истинности высказывания обозначается буквой μ с соответствующим индексом, например $\mu_{\tilde{A}}$.

Сложные нечеткие высказывания состоят из элементарных и логических операций: дизъюнкции, конъюнкции, импликации, эквивалентности, отрицания.

Степень истинности сложных высказываний:

- дизъюнкция: $\tilde{A} \vee \tilde{B} = \max(\mu_{\tilde{A}}; \mu_{\tilde{B}})$;
- конъюнкция: $\tilde{A} \wedge \tilde{B} = \min(\mu_{\tilde{A}}; \mu_{\tilde{B}})$;
- импликация: $\tilde{A} \rightarrow \tilde{B} = \max(1 - \mu_{\tilde{A}}; \mu_{\tilde{B}})$;
- эквивалентность: $\tilde{A} \leftrightarrow \tilde{B} = \min(\max(1 - \mu_{\tilde{A}}; \mu_{\tilde{B}}); \max(\mu_{\tilde{A}}; 1 - \mu_{\tilde{B}}))$;
- отрицание: $\neg \tilde{A} = 1 - \mu_{\tilde{A}}$.

Нечеткое множество рассматривается как некоторое подмножество произвольного непустого множества, характеризующееся определенным свойством.

Основные определения

Универсальное множество $X = \{x\}$.

Нечеткое множество $\tilde{A} = \{\langle \mu_{\tilde{A}}(x) / x \rangle\}$, где $\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0, 1]$ — отображение множества X в единичный отрезок называется функцией принадлежности нечеткого множества.

Носитель нечеткого множества: $S_{\tilde{A}} = \{x \mid x \in X \& \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\}$.

Пример. Пусть универсальное множество X соответствует множеству возможных значений одиночных выходов рельсов на участке пути в шт/км в пределах от 1 до 10. Нечеткое множество «малый выход рельсов» может быть представлено в виде:

$$\tilde{A} = \{\langle 1/1 \rangle, \langle 0,9/2 \rangle, \langle 0,8/3 \rangle, \langle 0,7/4 \rangle, \langle 0,5/5 \rangle, \langle 0,3/6 \rangle, \langle 0,1/7 \rangle, \langle 0/8 \rangle, \dots\}.$$

Функция принадлежности в приведенном примере показывает, насколько каждый элемент множества X может быть отнесен к множеству «малый выход рельсов». И степень истинности в нечетком высказывании и функция принадлежности в нечетком множестве носят субъективный характер. Их использование позволяет конкретному специалисту принимать решения в условиях действия «не» факторов.

Нечеткой переменной называется конструкция вида: $\langle \alpha, X, C \rangle$, где α — наименование нечеткой переменной; X — область определения; C — нечеткое подмножество на X , описывающее возможные значения нечеткой переменной.

Лингвистическая переменная — это конструкция вида: $\langle \beta, T, X, G_1, G_2 \rangle$, где β — наименование лингвистической переменной; T — множество значений (терм-множество); X — область определений; G_1 — синтаксиче-

ская процедура (грамматика), позволяющая оперировать элементами терм-множества, в частности генерировать новые термы; G_2 — семантическая процедура, позволяющая придать смысл новому терму.

Нечеткое бинарное отношение на множестве X характеризуется субъективной мерой связи элементов. Субъективная мера отношения есть функция принадлежности бинарному отношению, и обозначается: $\mu_R(x_i, x_j)$, где $(x_i, x_j) \in X$.

Нечеткое соответствие между множествами X и Y выражается в виде $\tilde{F} = (X, Y, \tilde{F})$, где $\tilde{F}$ — нечеткий график нечеткого соответствия.

2.5. ОПТИМИЗАЦИЯ В ПРОЦЕДУРАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При составлении всех видов описаний объекта проектирования следует ставить и решать оптимизационную задачу. Для этого на каждом этапе исследовательского проектирования должны быть определены независимые переменные, входящие в описание, ограничения и целевые функции. На каждой стадии описания ОП решается локальная задача оптимизации, отличающаяся частными целевыми функциями, независимыми переменными и методами решения этих задач. Помимо частных целевых функций на всех стадиях необходимо учитывать целевую функцию, которую можно считать глобальной. Эта целевая функция выражает приведенные затраты. Все остальные частные функции прямо или косвенно связаны с глобальной целевой функцией. Независимые переменные при постановке задачи оптимизации имеют различное выражение. Измеряться они могут по всем видам шкал — по шкале порядка, шкале отношения, по абсолютной шкале.

При составлении целевого описания независимыми переменными выступают цели проектирования, имеющие вербальное выражение. Задача сводится к выбору наиболее важных целей, исходя из всех факторов окружения. Основной шкалой измерения важности целей проектирования является шкала порядка, по которой происходит ранжирование целей.

На стадии составления концептуального описания независимыми переменными оказываются признаки ОП. Каждый из них выбирается в соответствии с целями проектирования и имеет множество значений. Задача оптимизации в этом случае заключается в выборе значений признаков по критериям, выраженным глобальной и локальными целевыми функциями, с учетом ограничений на допустимую стоимость машины и пороговых значений ряда признаков, относящихся, например, к надежности, технологичности, эргономичности и др. Значения

признаков измеряются по всем видам шкал. Например, масса или наработка на отказ измеряются по абсолютной шкале, а признаки эргономичности и эстетичности — по шкале отношений.

При составлении функционального описания независимыми переменными выступают признаки взаимодействия ОП со средой и сами частные функции. Оптимизация на этом этапе может достигаться применением функционально-стоимостного анализа (ФСА).

Составление структурного описания связано с выбором оптимального варианта технического решения. Независимыми переменными здесь выступают признаки элементов и их взаимодействия. При небольшом количестве возможных вариантов задачу структурной оптимизации можно решать при выполнении процедуры принятия решения (см. рис. 2.2). Однако, если число вариантов технического решения велико, то оптимизацию следует начинать уже при выполнении процедуры поиска вариантов, исключая заведомо неконкурентоспособные варианты. Из известных методов решения подобных задач можно указать на те из них, в основу которых положен принцип представления процесса поиска вариантов в виде многоступенчатой структуры [24]. 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. 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.

На этапе принятия решения возникает задача выбора оптимального действия. Она вызвана необходимостью ответить на следующие вопросы: достаточно ли разработано вариантов; не нужно ли продолжить их поиск; следует ли провести углубленный анализ всех вариантов или принимать решение на основе имеющейся информации?

Пример. Для выбора оптимального действия воспользуемся Байесовой теорией принятия решения. Допустим, что в ходе выполнения процедуры поиска технических решений найдено определенное количество вариантов. Для принятия решения возможно: продолжить поиск новых вариантов во избежание того, что лучший вариант еще не

вошел в найденное множество; провести углубленный анализ разработанных вариантов с целью более обоснованного выбора; не проводить углубленного анализа, а принимать решение на основе имеющейся информации. Какое предпринять действие?

Рассмотрим решение в форме алгоритма.

1. Составить список всех возможных операций.

В задаче их две: O_1 — приступить к принятию решения, O_2 — продолжить исследования.

2. Составить список всех возможных состояний:

θ_1 — найдено удовлетворительное решение, θ_2 — удовлетворительное решение не найдено.

3. Составить список всех возможных экспериментов $\{\epsilon\}$, включая нулевой ϵ_0 , под которым понимается отказ от поведения эксперимента.

В задаче экспериментами являются:

ϵ_1 — продолжить поиск новых вариантов;

ϵ_2 — проанализировать уже найденные варианты;

ϵ_0 — не проводить экспериментов.

4. Для каждого эксперимента составить список возможных результатов.

Поиск новых вариантов (эксперимент ϵ_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 ϵ_2 может привести также к двум результатам:

Z_3 — получена новая информация для более обоснованного принятия решения;

Z_4 — новой информации не будет найдено.

Нулевой эксперимент ϵ_0 дает неопределенный результат Z_0 . Для наглядности представим задачу в виде графа, маршруты которого отражают все возможные последовательности — эксперимент, результат, операция, состояние (рис. 2.5).

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 выразим ее условно в баллах.

Разобьем «выгоду» на две части: «выгоду» от эксперимента $u(\epsilon, Z)$ и выгоду от операции $u(O, \theta)$. Общая выгода в этом случае составит $u(\epsilon, Z, O, \theta) = u(\epsilon, Z) + u(O, \theta)$.

			$u(\epsilon, Z, O, \theta)$	$p''(\theta Z, \epsilon)$	$u^*(O, Z, \epsilon)$	$u^*(Z, \epsilon)$	$p(Z \epsilon)$	$u^*(\epsilon)$
ϵ_1	Z_1	$O_1 \theta_1$	6	0,37	2,22	2,22	0,38	0,84
		θ_2	-2	0,63	-1,26			
		$O_2 \theta_1$	5	0,37	1,85			
		θ_2	-4	0,63	-2,52			
	Z_2	$O_1 \theta_1$	0	0,9	0	0	0,62	
		θ_2	-8	0,1	-0,8			
		$O_2 \theta_1$	-1	0,9	-0,9			
		θ_2	-10	0,1	-1			
ϵ_2	Z_3	$O_1 \theta_1$	6	0,5	3	3	0,42	3,2
		θ_2	-2	0,5	-1			
		$O_2 \theta_1$	5	0,5	0,25			
		θ_2	-4	0,5	-0,2			
	Z_4	$O_1 \theta_1$	4	0,84	3,36	3,36	0,58	
		θ_2	-4	0,16	-0,64			
		$O_2 \theta_1$	3	0,84	2,52			
		θ_2	-6	0,16	-0,96			
ϵ_0	Z_0	$O_1 \theta_1$	5	0,7	0,35	2,8	1	2,8
		θ_2	-3	0,3	-0,9			
		$O_2 \theta_1$	4	0,7	2,8			
		θ_2	-5	0,3	-1,5			

Рис. 2.5. Граф принятия решений

Воспользуемся следующими предположениями.

Проведение эксперимента ϵ_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 в лучшую сторону), то выгоду от ϵ_1 оценим условно одним баллом, т.е. $u(\epsilon_1, Z_1) = 1$. При результате Z_2 , когда поиск не дает новых решений, «выгода» будет отрицательной, пусть $u(\epsilon_1, Z_2) = -5$.

Выгода от эксперимента ϵ_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 $u(\epsilon_2, Z_3) = 1$. Эксперимент ϵ_2 при результате Z_4 , напротив, приведет к отрицательному результату. Будут затрачены дополнительные ресурсы времени и труда, а полученная информация не окажется полезной для принятия решения. Принимаем $u(\epsilon_2, Z_4) = -1$.

Выгоду от нулевого эксперимента примем равной 0, т.е. $u(\epsilon_0, Z_0) = 0$.

Обратимся к оценке выгоды от операций.

Переход в данный момент времени процесса проектирования к выбору варианта технического решения (операция O_1), при возникновении в дальнейшем ситуации θ_1 (найдено 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 сулит 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 $p(Z|\epsilon, \theta)$.

Пусть априорная вероятность получения в конце процесса проектирования объекта, удовлетворяющего поставленным 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 $p(Z|\epsilon, \theta)$, мы идем как бы от обратного. Переменная состояния θ_i получила то или иное значение. Ставится во-

прос: 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 . 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 имеющимся), сравнительно невелика. Пусть $p(Z_1 | \varepsilon_1, \theta_1) = 0,2$. Тогда $p(Z_2 | \varepsilon_1, \theta_1) = 0,8$, как вероятность события входящего с Z_1 в полную группу. Остальные значения условных вероятностей результатов эксперимента ε_1 по симметрии:

$$p(Z_1 | \varepsilon_1, \theta_2) = 0,8; \quad p(Z_2 | \varepsilon_1, \theta_2) = 0,2.$$

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 апостериорное распределение вероятностей.

Воспользуемся формулой Байеса:

$$\begin{aligned} p''(\theta_1 | Z_1, \varepsilon_1) &= p'(\theta_1)p(Z_1 | \theta_1) / (p'(\theta_1)p(Z_1 | \varepsilon_1, \theta_1) + p'(\theta_2)p(Z_1 | \varepsilon_1, \theta_2)) = \\ &= (0,7 \cdot 0,2) / (0,7 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,8) = 0,37; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p''(\theta_2 | Z_1, \varepsilon_1) &= p'(\theta_2)p(Z_1 | \varepsilon_1, \theta_2) / (p'(\theta_2)p(Z_1 | \varepsilon_1, \theta_2) + p'(\theta_1)p(Z_1 | \varepsilon_1, \theta_1)) = \\ &= (0,3 \cdot 0,8) / (0,3 \cdot 0,8 + 0,7 \cdot 0,2) = 0,63. \end{aligned}$$

Остальные значения апостериорных вероятностей представлены на рис. 2.5.

8. Определить ожидаемую выгоду от каждой операции для каждой комбинации (эксперимент, результат) по формуле:

$$u^*(O, Z, \varepsilon) = \sum_{\theta} p''(\theta | Z, \varepsilon) u(\varepsilon, Z, O, \theta).$$

Результаты представлены на рис. 2.5.

9. Для каждой операции (эксперимент, результат) определяется оптимальная операция и относительная выгода (см. рис. 2.5):

$$u^*(Z, \varepsilon) = \max_o u^*(O, Z, \varepsilon).$$

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, например, для эксперимента ε_1 вероятность результата Z_1 равна:

$$p(Z_1|\varepsilon_1) = \sum_{\theta} p'(\theta)p(Z|\varepsilon, \theta) = 0,7 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,8 = 0,38.$$

Остальные вероятности результатов экспериментов представлены на рис. 2.5.

11. Для каждого эксперимента определить ожидаемую выгоду

$$u^*(\varepsilon) = \sum_Z p(Z|\varepsilon)u^*(Z, \varepsilon).$$

Например, для эксперимента ε_1 :

$$u^*(\varepsilon_1) = p(Z_1|\varepsilon_1)u^*(Z_1|\varepsilon_1) + p(Z_2|\varepsilon_1)u^*(Z_2|\varepsilon_1) = 0,38 \cdot 2,22 = 0,84.$$

Остальные результаты представлены на рис. 2.5.

12. Определить оптимальный эксперимент

$$u^*(\varepsilon) = \max u^*(\varepsilon).$$

В примере наибольшим из множества значений $u^*(\varepsilon)$ оказался $u^*(\varepsilon_2) = 3,2$. На этом основании принимаем решение о прекращении на рассматриваемом этапе проектирования поиска новых вариантов и о целесообразности проведения дополнительного анализа уже имеющихся вариантов.

При составлении динамического описания ($O\tilde{P}_5$) оптимизационная задача сводится к отысканию таких режимов работы ОП, при которых достигается максимум производительности с учетом ограничений на мощность, массу и некоторые другие показатели.

Параметрическое описание ($O\tilde{P}_6$) предполагает выбор всех необходимых параметров для конструирования ОП. В этом случае все параметры измеряются по абсолютной шкале, а их оптимизация становится неотъемлемым условием обеспечения требуемого уровня качества ОП.

2.6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

САПР (система автоматизированного проектирования) — организационно-техническая система, опирающаяся на средства ее обес-

печения. Для наглядности эти средства изображены на рис. 2.6 в виде дерева. Ветви его изображают техническое, программное, информационное, организационное, лингвистическое, математическое обеспечение. Ствол дерева, питающий ветви, представлен как методическое обеспечение, а корень, поддерживающий и питающий все дерево, играет роль методологии проектирования. Успех в развитии методологии проектирования предопределяет успех в развитии САПР.

В настоящее время автоматизированное проектирование достигло огромных успехов. Средства обеспечения САПР поддерживают все процедуры проектирования, начиная с анализа принятого решения. Намного скромнее поддержка ранних стадий проектирования: технического задания и технического предложения. Причина в том, что эти стадии носят творческий характер, а творчество пока доступно только человеческому интеллекту. Для того чтобы искусственный интеллект

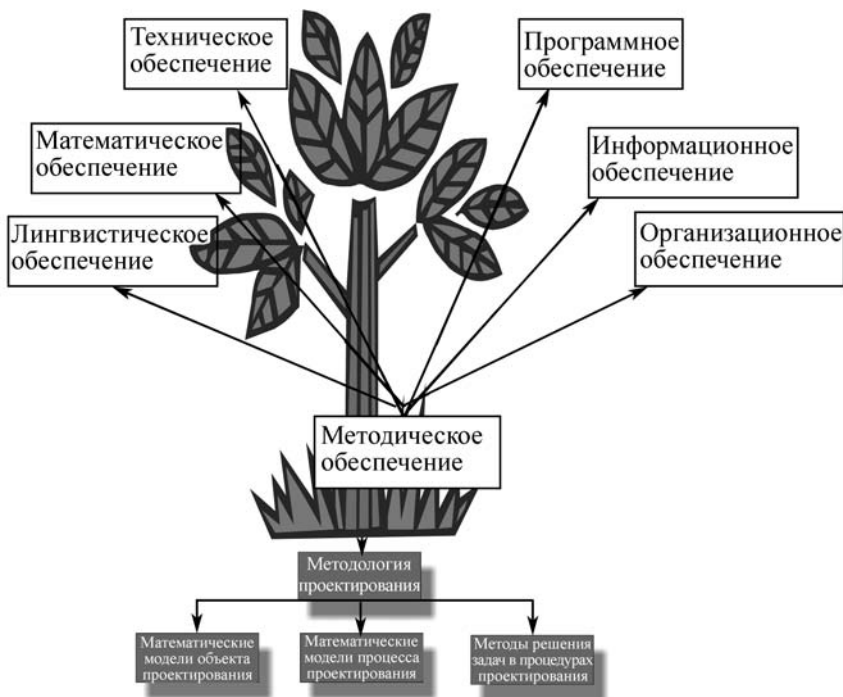


Рис. 2.6. Средства обеспечения САПР

(ИИ) стал помощником проектировщика, он должен обладать аппаратом знаний, аппаратом, способным приобретать знания и использовать их для решения задач. Работают с использованием аппарата знаний экспертные системы, уже получившие применение в медицине, геологии, военном деле и некоторых других областях. В области проектирования программные средства, построенные на знаниях, лишь делают первые шаги. Однако уже сейчас многие интегрированные программные комплексы имеют модули работы со знаниями.

В последние годы все заметней становится тенденция изготовления продукции «на заказ» вместо поставки ее «со склада». Это заставляет использовать средства управления конфигурацией изделий. Вместе с этим многие компании предпочитают нанимать специалистов лишь на срок выполнения производственной темы, сводя к минимуму штат постоянных сотрудников. В этих условиях проектные организации должны обладать способностью перенастраиваться на разработку новой продукции, не имея для этого квалифицированных специалистов. Такими способностями может обладать Гибкое автоматизированное конструкторское бюро (ГАКОБ), использующее трансформацию интуитивных знаний ведущих специалистов в явные. Это делает опыт немногих достоянием всего остального коллектива. Реализовать такие способности ГАКОБ можно с помощью Программно-методического комплекса (ПМК). Для выполнения функции перенастройки ПМК должен состоять из операционной среды, независимой от предметной области и воплощающей методику проектирования, и базы знаний. База знаний, относящаяся к объекту проектирования, отделена от операционной среды и хранится на сменном носителе. Наполнять базу знаниями смогут инженеры по знаниям на основе ознакомления с опытом работы специалистов высокой квалификации (экспертов) в конкретной предметной области. Переход на проектирование новых объектов сопровождается подключением соответствующей базы знаний к операционной среде ПМК.

Попытаемся определить, в чем может состоять программная поддержка ранних стадий проектирования. Предположим, что работа конструктора организована на базе автоматизированного рабочего места (АРМ) с необходимыми техническими и программными средствами в рамках ГАКОБ.

Конструктор, получив заявку на проектирование объекта техники, должен убедиться прежде всего в том, что работа по проектированию действительно необходима. Для этого он вызывает программу определения потребности проектирования. Программа предлагает конструктору вы-

полнить ряд операций. Во-первых, установить, нет ли заявленного объекта 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, программа напомнит конструктору, что заданный объект проектирования может входить и 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 программу 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 базе данных по существующим зарубежным образцам ответит на вопрос о существовании зарубежных аналогов и предложит заказчику задуматься над возможностью его приобретения. Если приобретение объекта за рубежом не исключается, то может быть вызвана программа определения экономической эффективности импорта. В-четвертых, программа даст возможность убедиться в экономической целесообразности создания объекта по параметрам, указанным в заявке. В случае если целесообразность не подтверждается, могут быть определены необходимые изменения в исходных данных на проектирование.

Если конструктор в ответе на вопросы испытывает некоторые сомнения, то он может ввести показатель, характеризующий степень его уверенности.

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 должен 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 в соответствующей области.

Программа выбора целей предложит множество целей на всех уровнях интересов общества, включенное в базу данных. Конструктор, руководствуясь заявкой, сценарием развития и собственными соображениями, отвечая на запрос ЭВМ, отбирает из множества некоторые

цели, а при необходимости включает в их перечень и дополнительные. Вслед за этим программа попросит конструктора сообщить о наличии попарной взаимосвязи целей, о весе целей в долях единицы, с точки зрения их важности, 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 важности. 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 вошли в установленное их множество. Если конструктором были указаны дополнительные цели, то программа попросит его по каждой из них сообщить, какое подмножество признаков относится к целям, выведет на экран видеотерминала все элементы этого подмножества и вновь обратится с просьбой указать на те признаки, 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 ТЗ, для чего может быть предусмотрена специальная программа. После ее вызова конструктору в ответ на запросы необходимо будет ввести исходную информацию, предусмотренную заявкой и условиями проведения работ, включая фамилии разработчиков проекта, наименование организаций и фамилий 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 технического предложения. Здесь возможно применение некоторой экспертной системы,

формирующей варианты технического решения исходя из установленных признаков объекта проектирования.

Сформировав, таким образом, множество вариантов технического решения объекта проектирования, включив в него и собственные варианты, следует перейти к выбору оптимального варианта. Для выполнения этой процедуры может быть предусмотрена соответствующая программа. 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 сможет установить приоритет вариантов на основе их попарных сравнений по каждому критерию. 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 специальных программ. В результате станет возможным произвести оценку вариантов вычислительным методом. При выборе первого направления дорабатывается множество вариантов объекта проектирования включением в него новых технических решений, вырабатываемых самим конструктором или экспертной системой, после чего конструктор вновь обращается к выбору оптимального варианта.

Выбранный в качестве оптимального вариант подвергается тщательному анализу. Для его выполнения должен быть предусмотрен комплекс специализированных программ.

Третья и последующие стадии проектирования связаны с конструктивным воплощением выбранного варианта объекта. Для выполнения этих работ уже существуют программные комплексы автоматизированного проектирования. Приступая к компоновке объекта проектирования, конструктор должен выбрать значения всех основных его параметров. Некоторые из них уже определены заявкой на проектирование или некоторыми стандартами, а другие могут варьироваться в заданных пределах. Для оптимизации параметров конструктором может быть сформирован специальный комплекс программ. В него могут войти 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.

Из приведенного сценария ранних стадий проектирования можно видеть, что используемая в нем информация может быть отнесена или к проблемно-ориентированной, или к предметно-ориентированной. Проблемно-ориентированная информация составит некоторую операционную среду, не зависящую от объекта проектирования, в то время как предметно-ориентированная информация непосредственно с ним связана. Такое представление создает предпосылки создания гибкого автоматизированного конструкторского бюро (ГАКОБ). Ядром его выступает упомянутая выше операционная среда. Предметно-ориентированная информация может храниться на внешних носителях. Сформировать ее следует поручить экспертам, т.е. специалистам в соответствующих предметных областях. В таких условиях ГАКОБ может быстро перенастраиваться на проектирование новой продукции, даже если у работающих в нем специалистов нет опыта создания этой новой продукции.

Программная поддержка ГАКОБ реализована на кафедре подъемно-транспортных, путевых и строительных машин ПГУПС с привлечением студентов под руководством авторов в виде Программно-методического комплекса (ПМК). Экспертная система для поиска вариантов технического решения ЭКОН-1.0 разработана В.В. Быковым. О программной поддержке ГАКОБ речь пойдет в последующих главах, а реализовать ее в состоянии любой специалист, владеющий программированием, например, на языке Visual Basic.

Глава 3

ПРОЦЕДУРЫ НА СТАДИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

3.1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ В РАСПОЗНАВАНИИ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Техническое задание (ТЗ) — первый и весьма важный конструкторский документ. Согласно ГОСТ Р 15.201—2000 ТЗ является исходным документом для разработки продукции и должно содержать технико-экономические требования к ней, определяющие потребительские свойства и эффективность ее применения. Важность ТЗ связана с тем, что оно закладывает основы будущих технических решений и, кроме того, является юридическим документом для рассмотрения разногласий между заказчиком и разработчиком.

Ранее в ГОСТ 15.001—73, учитывая важность ТЗ, определялись: основные требования к содержанию технического задания, порядок разработки, согласования и утверждения, порядок построения изложения и оформления ТЗ.

В ГОСТ 15.001—88 и в сменившем его ГОСТ Р 15.201—2000 требования к содержанию ТЗ значительно занижены. Более того, в качестве технического задания допускается использовать любой документ (контракт, протокол, эскиз, и др.). Главное, чтобы ТЗ, или заменяющий его документ, было согласовано с заказчиком и содержащиеся в нем требования к продукции не противоречили стандартам и нормативным документам органов, осуществляющих надзор за безопасностью, охраной здоровья и природы.

В соответствии с основными положениями ГОСТ Р 15.201—2000 ТЗ остается основой для выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР) и ТЗ ориентирует разработчиков на выпуск продукции, удовлетворяющей потребности народного хозяйства, населения и экспорта. Среди требований к продукции выделяются обязательные, установленные государственными стандартами и другими нормативными документами на основе законодательства Российской Федерации. Эти требования относятся к безопасности продукции, работ и услуг, для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества, технической и ин-

формационной совместимости, взаимозаменяемости продукции, единства методов контроля и единства маркировки, а также иные требования, установленные законодательством Российской Федерации.

На стадии ТЗ распознавание сводится к составлению концептуального описания объекта проектирования, включающего определение: потребности в разработке новой продукции, целей разработки и признаков объекта. Ошибки, допущенные на стадии ТЗ, могут самым пагубным образом отразиться на конечных результатах: создание некачественного объекта или отправка проекта «на полку». Это может произойти, если будет допущена ошибка:

- в определении потребности в новой продукции как результат недостаточного обоснования спроса на нее или из-за непредвиденных изменений в технологии производства;
- в целях проектирования в результате неполного или неверного учета требований к объекту с позиций различных сфер его будущего окружения (научно-технического, социального, экономического, природного, производственного);
- в определении признаков объекта (свойств), что не дает возможности достичь поставленных целей.

Анализ ТЗ, выполненный 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 и норм, на порядок согласования, контроля и приемки и т.д. Технические задания на однотипную продукцию содержат, как правило, одинаковую структуру предложений внутри одноименных разделов. В общем объеме ТЗ на традиционную для проектной организации продукцию постоянная информация занимает больше половины общей информации.

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 еще до составления ТЗ (наименование предприятия изготовителя, должность и фамилии лиц, согласующих и утверждающих ТЗ).

Переменная информация самым непосредственным образом связана с объектом проектирования. Она образуется в ходе преобразова-

ния исходной информации при выполнении процедур определения потребности в проектировании, выборе целей и признаков.

В рамках ГАКОБ ТЗ составляется на основе гибридной экспертной системы (ГЭС).

Схема ГЭС представлена на рис. 3.1. Блок, названный «Операционная среда», представляет проблемно-ориентированную часть системы и выполнен в виде приложения к Windows. Блок «Внешний массив данных и знаний» является предметно-ориентированным, содержит БД и БЗ для проектирования конкретного вида объектов.

*Внешний массив
данных и знаний*

Операционная среда

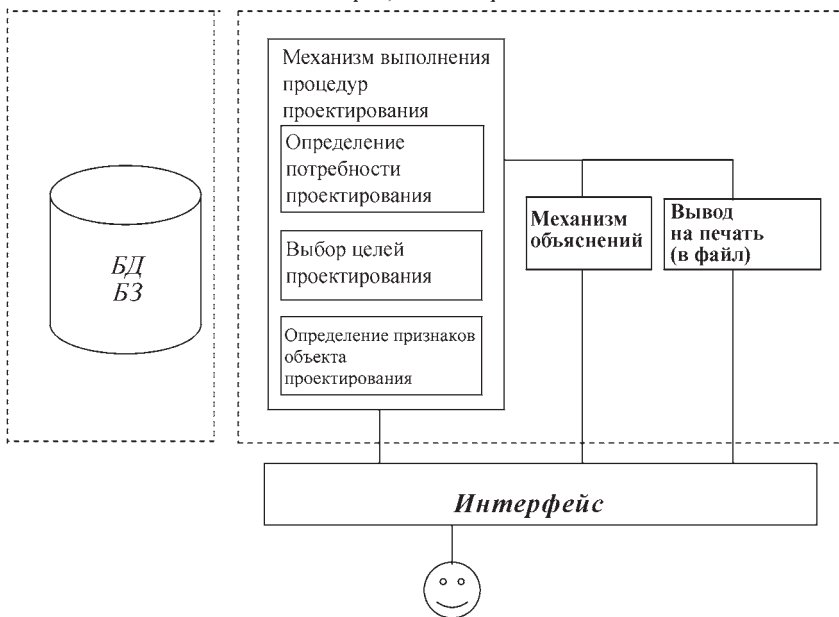


Рис. 3.1. Схема гибридной экспертной системы для разработки ТЗ

Программный комплекс для выполнения технического задания, входящий в ПМК, назовем П1. Исходная форма этого комплекса представлена на рис. 3.2. Текстовое поле «Область техники» заполняется в момент загрузки формы обращением к файлу, находящемуся

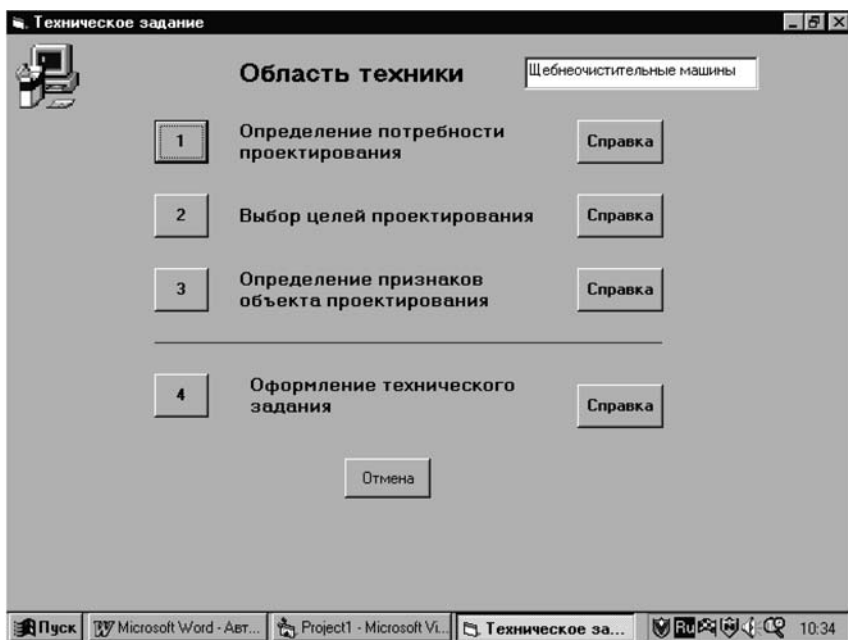


Рис. 3.2. Форма представления программного комплекса П1

на носителе внешнего массива данных и знаний и содержащего название конкретного раздела знаний. Щелчок по кнопке 1, 2 или 3 вызовет формы для выполнения соответствующих процедур проектирования. О содержании этих процедур можно узнать, вызвав справку. Исходная форма может быть представлена и иначе, например, с использованием меню.

3.2. ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.2.1. Содержание процедуры

Потребность в проектировании на специализированных предприятиях диктуется необходимостью совершенствования выпускаемой продукции. Вопроса надо или нет проектировать здесь не возникает, иначе предприятие потеряет рынки сбыта. Иначе обстоит дело в про-

ектных организациях, выполняющих работу по внешним заказам или в том случае, когда предприятие вынуждено переходить на выпуск принципиально новой продукции. Вот здесь возникает вопрос — нужно ли проектировать. К чему может привести ошибка при ответе на этот вопрос. Во-первых, может быть спроектирован уже существующий объект. Во-вторых, в ходе проектирования или даже в конце его объект может оказаться не нужным заказчику из-за изменившихся условий производства. В-третьих, объект, созданный по выполненному проекту, не окажется способным принести ожидаемый эффект. В-четвертых, может оказаться, что объект существует, например, в другой стране, и его целесообразней купить.

Процедура определения потребности проектирования относится к маркетинговым исследованиям, и выполнять ее сможет заказчик вместе с проектировщиком.

Технический объект нужно проектировать тогда, когда такого объекта не существует, а если он есть, его нельзя приобрести; от объекта нельзя отказаться; и тогда, когда затраты на проектирование, подготовку производства и изготовление окупятся в установленный срок и принесут положительный эффект.

3.2.2. Формальное описание процедуры определения потребности проектирования

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 эффект;

Y5 — можно приобрести объект за рубежом.

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

$$Y = \neg Y1 \wedge \neg Y3 \wedge Y4 \wedge \neg (Y5 \wedge Y2).$$

Область определения функции:

$$Y = (\text{FALSE}, \text{TRUE}),$$

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

При выполнении процедуры определения потребности проектирования высказывания Y1...Y5 обладают нечеткостью. В связи с этим степень истинности простых высказываний определяется на множестве [0,1]. При этом $\neg \tilde{Y}_i = 1 - \tilde{Y}_i$, $\tilde{Y}_i \wedge \tilde{Y}_j = \min(\tilde{Y}_i, \tilde{Y}_j)$.

Пример. На железных дорогах промышленного транспорта и в частности в карьерах по добычи полезных ископаемых открытым способом для выполнения путевых работ используются машины легкого типа в отличие от магистральных железных дорог, где, напротив, применяются тяжелые машины, обладающие высокой производительностью. Применение тяжелых машин для путевых работ на железнодорожных путях промышленного транспорта неэкономично, а иногда и невозможно. Задача разработать техническое предложение легкой щебнеочистительной машины.

Потребность в проектировании легкой щебнеочистительной машины (в дальнейшем ЩОМ) диктуется следующими обстоятельствами:

- уверенность в том, что такая машина уже существует в нашей стране — невысока, пусть $\tilde{Y}_1 = 0,2$;

- возможность отказа от применения легких ЩОМ также невелика, потому, что очистка щебня остается неотъемлемой операцией ремонта пути, а существующие отечественные машины оказываются тяжелыми и особо тяжелыми. Применение их на железнодорожных путях промышленного транспорта неэффективно или зачастую невозможно. Отказаться от применения ЩОМ возможно, если применять железнодорожный путь на плитном основании. Такого рода пути используются в мировой практике. Однако в нашей стране они еще не применяются, и на основании прогноза не будут применяться в ближайшие годы. Пусть $\tilde{Y}_3 = 0,3$;

- в зарубежной практике имеются легкие ЩОМ ($\tilde{Y}_2 = 1$). В США используются ЩОМ пяти типоразмеров: особо легкие, легкие, средние, тяжелые и особо тяжелые. Приобретение машин за рубежом связано с весьма существенными затратами. К тому же наша страна обладает научно-техническим потенциалом для создания собственной техники. Пусть $\tilde{Y}_5 = 0,3$;

- применение легких ЩОМ обеспечит экономический эффект за счет сокращения расхода дорогостоящего щебеночного материала, примем $\tilde{Y}_4 = 0,8$.

Степень истинности сложного высказывания: $\tilde{Y} = \min(0,8; 0,7; 0,8; 0,7)$. В данной ситуации высказывание о необходимости проектирования объекта имеет истинное значение со степенью 0,7. Так как это значение превышает 0,5, проектировать скорее надо, чем нет.

3.2.3. Автоматизированное выполнение процедуры определения потребности проектирования

Для выполнения процедуры определения потребности проектирования в программном комплексе П1 предусмотрен модуль П1.1.

Модуль П1.1 организует диалог с пользователем, в ходе которого выясняется потребность развертывания процесса проектирования, общается с базами данных по существующим отечественным и зарубежным объектам. В итоге работы программы делается вывод о необходимости проектной разработки. По желанию пользователя выдается справка о том, на каком основании сделан этот вывод.

Текстовое поле «Объект проектирования» заполняется в процессе загрузки программы обращением к специальному файлу на внешнем носителе, содержащим БЗ для проектирования щебнеочистительных машин.

Кнопки «Помощь», при их использовании, открывают файлы в БЗ, относящиеся к соответствующим вопросам. Так, щелчок по такой кнопке при необходимости ответить на вопрос: «Объект проектирования имеется в нашей стране?» приводит к открытию БД по отечественным щебнеочистительным машинам. Аналогично обстоит дело и при использовании кнопки «Помощь» при ответе на вопрос: «Объект проектирования имеется за рубежом?». В этом случае открывается БД по зарубежным машинам. Помощь при ответе на вопрос: «От объекта проектирования можно отказаться?» заключается в том, что пользователю предоставляется возможность познакомиться с особенностями технологии работ при ремонте железнодорожного пути, с тенденциями развития конструкции пути, с передовым опытом предприятий, занимающихся путевыми работами.

Использование помощи при ответе на вопрос: «Можно приобрести объект за рубежом?» дает возможность определить экономическую целесообразность импорта объекта, а для вопроса: «От применения объекта проектирования достигается эффект?» — определить ожидаемую экономическую эффективность от внедрения объекта.

Щелчок по кнопке «Вычислить» приводит к появлению в текстовом поле ответа на вопрос надо или нет проектировать, а по кнопке «Почему?» — к выводу пояснения.

Представленная на рис. 3.3 форма модуля П1.1 представляет итог выполнения процедуры определения потребности проектирования щебнеочистительной машины для выполнения капитального ремонта пути на железнодорожных путях промышленного транспорта. Ответы на вопросы о наличии подобных машин в нашей стране и за рубежом получены с помощью обращения к соответствующим БД. Было установлено, что в нашей стране легких балластоочистительных машин, необходимых для производства работ в условиях промышленного транспорта, серийно не производилось. Несмотря на отсутствие таких

Объект проектирования			
Помощь	Объект проектирования имеется в нашей стране ?	☒ ДА ☐ НЕТ	Степень уверенности в долях единицы: 0.8
Помощь	Объект проектирования имеется за рубежом ?	☒ ДА ☐ НЕТ	Степень уверенности в долях единицы: 0.9
Помощь	От объекта проектирования можно отказаться?	☒ ДА ☐ НЕТ	Степень уверенности в долях единицы: 0.7
Помощь	Можно приобрести объект за рубежом?	☒ ДА ☐ НЕТ	Степень уверенности в долях единицы: 0.9
Помощь	От применения объекта проектирования достигается эффект?	☒ ДА ☐ НЕТ	Степень уверенности в долях единицы: 0.9

Результат	
Проектировать надо	Степень уверенности в долях единицы: 0.7

Вычислить

Почему?

Объекта нет в нашей стране, нет возможности приобрести его за рубежом, создание ОП принесёт эффект.

Рис. 3.3. Форма программного модуля П1.1

машин в БД, степень уверенности в ответе на вопрос о наличии необходимой машины в нашей стране определена величиной 0,8. Это связано с возможностью существования подобной машины, созданной в единственном экземпляре в какой-либо организации и не получившей широкую известность.

Ответ на вопрос о наличии необходимой машины за рубежом — положительный, т.е. обнаружена машина, соответствующая условиям производства работ на железнодорожных путях промышленного транспорта. Степень уверенности в правильности ответа — 0,9. Она не равна 1 (полная уверенность) из-за некоторого сомнения относительно выпуска таких машин в настоящее время.

При ответе на вопрос: «От объекта проектирования можно отказаться?» также использовалась помощь. Она показала, что в настоящее время от очистки балластного слоя нельзя отказаться, так как, во-первых, щебеночный балласт остается необходимым в устройстве же-

лезнодорожного пути, а во-вторых, и это подтверждено расчетом, повторное использование путевого щебня после его очистки, более рационально по сравнению с его заменой. Несмотря на это, степень уверенность в невозможности отказа от объекта проектирования принята равной всего лишь 0,7. Это вызвано уже давно ведущимися работами, связанными с использованием плитного основания вместо шпальной решетки. Такого рода основание может существенно снизить объем использования щебня.

Помощь при ответе на вопрос: «Можно приобрести объект за рубежом?» показала экономическое преимущество создания собственной машины по сравнению с ее закупкой. Степень уверенности в правильности отрицательного ответа на этот вопрос достаточно высока — 0,9.

Помощь при ответе на вопрос: «От применения объекта проектирования достигается эффект» позволила установить путем технико-экономического расчета ожидаемый экономический эффект и срок окупаемости капитальных затрат. Это позволило положительно ответить на вопрос со степенью уверенности 0,9.

Результатом выполнения подпрограммы П1.1 стало сообщение: «Проектировать надо», а использование команды «Почему?» привело к появлению в соответствующем текстовом поле пояснения: «Объекта нет в нашей стране, нет возможности приобрести его за рубежом, создание ОП принесет эффект».

3.3. ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.3.1. Содержание процедуры

Исследовательское проектирование связано с распознаванием объекта, наилучшим образом отвечающего поставленным целям. Цели проектирования определяются требованиями непосредственного и косвенного окружения объекта. К непосредственному окружению надо отнести среду, внутри которой будет обитать объект. К косвенному — относятся факторы, определенные научно-технической, экономической и социальной ситуацией (рис. 3.4).

Выявлению требований для проектирования в настоящее время уделяется большое внимание. Требования являются основой для любого проекта. Они определяют потребности «заинтересованных сторон» — заказчиков, разработчиков, потребителей и тот функционал, которым должен обладать объект проектирования для удовлетворения этих потребностей. Основной причиной «провала» проектов оказыва-



Рис. 3.4. Сферы окружения объекта проектирования

ется неполнота требований. Немаловажное значение для «провала» имеет и потеря необходимости проекта за время его выполнения.

Разработка требований должна принимать во внимание природу проектируемой системы и учитывать ее внешне окружение. Так, требование повышения скорости движения железнодорожного транспорта неразрывно связано с требованиями к:

- подвижному составу;
- железнодорожному пути;
- станциям и их персоналу;
- машинистам и их способности управлять скоростными поездами;
- системам сигнализации и связи;
- системам управления железнодорожным движением;
- службам энергообеспечения;
- службам обеспечения безопасности движения поездов.

Требования сопровождают все стадии проектирования. На стадии ТЗ их можно назвать пользовательскими, потому что составлять их должны главным образом потребители продукции. Заинтересованными сторонами, определяющими требование к продукции, могут быть люди или организации, имеющие определенное отношение к объекту проектирования. Одни из них влияют на объект и взаимодействуют с ним, на других объект влияет и воздействует.

К заинтересованным сторонам можно отнести:

- руководство: люди, отвечающие за техническую политику в отрасли народного хозяйства, за бюджет разработки, за бюджет организации, в которой объект будет использоваться;
- инвесторы: люди, приглашенные к финансированию или уже вложившие деньги в разработку объекта;
- заказчики или покупатели, кому придется непосредственно использовать объект;

- обслуживающий персонал, отвечающий за исправное состояние объекта;
- операторы, управляющие работой объекта;
- обучающий персонал, осуществляющий подготовку операторов;
- маркетинг и продавцы, играющие ключевую роль в определении возможностей объекта, особенно относящегося к серийной или массовой продукции;
- эксперты по области применения, знающие особенности условий работы проектируемого объекта;
- общественное мнение

Пользовательские требования составляются в ходе маркетинговых исследований, представляются в виде описания без ограничений к форме. Тем не менее, они должны быть по возможности краткими, реалистичными, не содержать указаний на возможную реализацию. Наиболее частые ошибки пользовательских требований:

- уклон в сторону возможных технических решений;
- недостаточное внимание к реальным проблемам;
- отсутствие у заинтересованных сторон понимания ответственности за выдвигаемые ими требования.

Постоянные требования, подразумевающиеся практически всегда [46]:

1) максимально достижимый уровень эксплуатационных свойств: минимальные габариты, минимальная масса, минимальное потребление энергии, доступность и заменяемость всех элементов, имеющих ограниченный срок службы, оптимальная надежность;

2) оптимальные эргономические показатели: простое, легкое и удобное обслуживание, защита от вредных побочных выходов (помех), таких, как шум, тепло, вибрация, выхлопные газы, пыль и т.д., минимальный вред окружающей среде;

3) максимальный учет всех особенностей существующего производства: применение имеющихся материалов, стандартных деталей и документации, использование имеющегося оборудования и технологии;

4) наилучшие эргономические показатели: минимальные издержки производства; минимальные эксплуатационные расходы.

Некоторые требования выступают как ограничения в выборе решений, диктуемые природой и обществом.

Пользовательские требования определяются главным образом заказчиком или потребителями продукции.

На основании пользовательских требований разработчик должен составить цели проектирования. Цели проектирования вытекают из пользовательских требований, но в отличие от них цели должны быть

четким руководством к последующим действиям, поэтому не могут допускать противоречий. Помимо этого предоставление целей проектирования должно давать возможность:

- однозначно идентифицировать каждую из них;
- классифицировать цели по важности;
- установить взаимосвязь целей.

Задача определения целей проектирования осложняется тем, что проектируемый объект должен отвечать требованиям не в настоящем времени, а в будущем. Необходимо учитывать, что за время разработки объекта могут произойти изменения в его окружении. Так, например, факторы научно-технической ситуации могут повлиять на выбор физических принципов действия машины. В социальной сфере могут измениться требования к форме изделий, определяемой модой, к эргономическим и экологическим показателям. Не остаются постоянными и экономические требования. В связи с этим определение целей исследовательского проектирования требует прогнозирования. Здесь уместно обратиться к приему составления сценария. 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 [30].

На первом этапе составления сценария формируются самые общие представления о проектируемом объекте, и поэтому взаимное влияние факторов можно не учитывать. Здесь, по существу, происходит лишь выявление признаков ситуации, причем следует начинать с самых простых и очевидных, переходя затем к более сложным и менее очевидным. Выявление факторов окружения подобно эмпатии (вживании 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.

3.3.2. Формальное описание процедуры определения целей проектирования

Для наглядного представления и систематизации целей удобно использовать граф. Все общественное окружение объекта проектирования разбивается на уровни в зависимости от их масштаба. На первом уровне помещается сфера, охватывающая интересы всего человечества. На втором — интересы государства. Далее размещаются сферы интересов отрасли, 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 образует граф целей (рис. 3.5). 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.

Цели проектирования на каждом уровне интересов общества неравнозначны по своей важности. Одни из них необходимо достичь

I. Интересы всего человечества

II. Государственные интересы

III. Интересы отрасли

IV. Интересы заказчика

V. Интересы проектной организации

VI. Интересы отдела

VII. Интересы личные

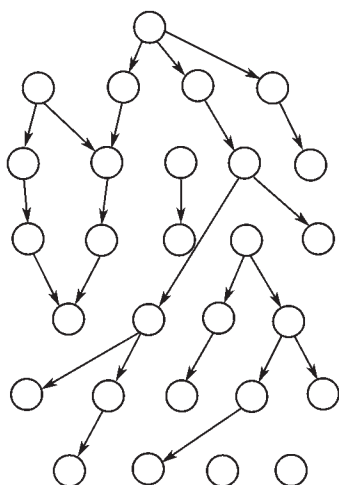


Рис. 3.5. Граф целей, ориентированный относительно уровней интересов общества

обязательно, другие — желательны. Некоторыми из них можно пренебречь. Важность цели можно установить по функции принадлежности к нечеткому подмножеству «важные цели»:

$$\tilde{A}_0 = \{\langle \mu_{A_0}(a) | a \rangle\}, a \in A.$$

Для определения функции принадлежности воспользуемся методом попарных сравнений (табл. 3.4).

3.4. Шкала для попарных сравнений

Количественная оценка	Качественная оценка	Примечание
1	Одинаковая значимость	Цели имеют одинаковую значимость
3 1/3	Слабое превосходство Слабая уступка	Соображения о предпочтении одной цели над другой мало убедительны
5 1/5	Очевидное превосходство Очевидная уступка	Существует убедительное свидетельство о превосходстве одной цели над другой
7 1/7	Сильное превосходство Сильная уступка	Имеется надежное доказательство существенного превосходства одной цели над другой
9 1/9	Абсолютное превосходство Абсолютная уступка	Свидетельство в пользу предпочтения одной цели перед другой в высшей степени убедительно

В табл. 3.4 количественные оценки 1, 3, 5, 7, 9 отвечают соответствующим пунктам качественных оценок, а оценки 2, 4, 6, 8 присваиваются в промежутках качественных оценок.

В результате будет построена матрица:

$$\overline{M} = \|c_{ij}\|, \quad c_{ij} \in \{1, 2, \dots, 9\}, \quad c_{ji} = 1/c_{ij},$$

где c_{ij} — количественная оценка значимости для проектирования объекта цели i по сравнению с целью j .

Составляющие собственного вектора этой матрицы могут быть приняты за значения функции принадлежности, при условии, что они имеют относительное значение, т.е.

$$\sum \mu'_{A_0} = 1.$$

Абсолютные значения функции принадлежности для элементов подмножества A_0 можно найти, если их относительные значения разделить на большее из них.

Справка

Собственным значением матрицы называется спектр скалярных величин λ , при которых определитель матрицы $|\bar{M} - \lambda \bar{I}|$ равен нулю, где $\bar{I}$ — единичная матрица.

Собственный вектор матрицы есть вектор, который будучи умноженным на матрицу $\bar{M} - \lambda \bar{I}$, дает в результате нулевую матрицу.

Связь целей на разных уровнях общественных интересов проявляется в том, что некоторые из них могут оказаться средством к достижению других, находящихся на более высоком уровне.

Коэффициент связи — произведение весов целей, связанных на графе дугой. Обозначим его $K_{ij,km}$, где 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, у которой оказался наибольшим абсолютный вес, равный сумме значения ее функции принадлежности и коэффициентов связи по заходящим в нее дугам.

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 дуги инцидентной вершинам. Если она есть, то элемент матрицы принимает значение 1, если нет — 0. Матрица смежности имеет строго треугольный вид. Отсутствие петель приводит к 0 значения элементов на главной диагонали. Теперь абсолютный вес каждой цели определим, добавив к значению функции принадлежности сумму элементов соответствующего столбца матрицы весов. Наиболее важной целью следует считать ту, у которой больший абсолютный вес.

Пример. Исходя из потребностей проектирования ЩОМ для промышленного транспорта и факторов непосредственного и косвенного

ее окружения после определения пользовательских требований сформулированы следующие цели проектирования на трех уровнях общественных интересов — общечеловеческих, заказчика, проектной организации (представлены не все цели реального проектирования).

Научно-техническая ситуация.

На уровне заказчика:

- создание легкой ЩОМ, работающей в комплексе с другими легкими машинами (a_{21});
- повышение надежности машины по сравнению с существующими отечественными ЩОМ (a_{22});
- повышение технологичности в обслуживании и ремонте (a_{23});
- повышение глубины вырезки по сравнению с существующими ЩОМ (a_{24}).

На уровне проектной организации:

- использование наиболее перспективных технических решений (a_{31});
- обеспечение надежности объекта проектирования (a_{32});
- обеспечение заданной производительности объекта (a_{33}).

Экономическая ситуация.

На уровне заказчика:

- машина должна быть конкурентоспособной и иметь спрос на внутреннем и внешнем рынке (a_{25});
- затраты на проектирование, подготовку производства и изготовление должны окупаться в нормативный срок (a_{26}).

На уровне проектной организации:

- снижение расходов на проектирование (a_{34}).

Непосредственное окружение.

На уровне общечеловеческих интересов:

- защита окружающей среды (a_{11});

На уровне заказчика:

- создание машины для работы в районах с умеренным климатом (a_{27}).

На уровне проектной организации:

- обеспечение сохраняемости объекта проектирования в условиях умеренного климата (a_{35}).

Социальные требования.

На уровне заказчика:

- обеспечение удобства управления машиной и ее привлекательности (a_{28}).

На уровне проектной организации:

- повышение эргономических и эстетических показателей (a_{36}).

Граф целей представлен на рис. 3.6.

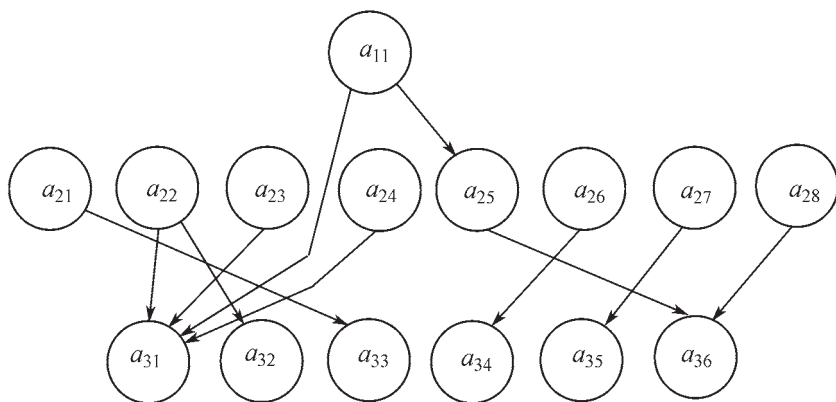


Рис. 3.6. Граф целей проектирования щетнеочистительной машины

Допустим, что матрицы попарных сравнений для определения важности целей на уровне интересов заказчика и проектной организации имеют вид:

	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	a_{28}		a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}
a_{21}	1	1	3	1/3	5	7	5	5	a_{31}	1	1	1/5	1/3	1	1
a_{22}	1	1	3	3	7	5	5	3	a_{32}	1	1	3	5	5	1
a_{23}	1/3	1/3	1	5	3	3	7	3	a_{33}	5	1/3	1	1/3	3	3
a_{24}	1	1/3	1/5	1	1/3	5	7	3	a_{34}	3	1/5	3	1	1/3	1/5
a_{25}	1/5	1/7	1/3	3	1	3	3	1	a_{35}	1	1/5	1/3	3	1	1/5
a_{26}	1/7	1/5	1/3	1/5	1/3	1	7	1/5	a_{36}	1	1	1/3	5	5	1
a_{27}	1/5	1/5	1/7	1/7	1/3	1/7	1	1/5							
a_{28}	1/5	1/3	1/3	1/3	1	5	5	1							

Собственный вектор матрицы, соответствующий наибольшему собственному ее значению, найдем приближенным способом с достаточной для решаемой задачи точностью. Для этого просуммируем каждый столбец матрицы и определим обратное значение суммы. Полученные величины и составят приближенно компоненты собственного вектора матрицы. Их принимаем за относительные значения функций

принадлежности множества целей к нечеткому множеству «важные цели». Абсолютные значения функций принадлежности получим, разделив их относительные значения на большее из них. Так, для множества целей на уровне заказчика нечеткое множество «важные цели» имеет вид

$$\tilde{A}_{02} = \{\langle 0,86|a_{21} \rangle, \langle 1|a_{22} \rangle, \langle 0,42|a_{23} \rangle, \langle 0,27|a_{24} \rangle, \langle 0,2|a_{25} \rangle, \langle 0,12|a_{26} \rangle, \langle 0,1|a_{27} \rangle, \langle 0,21|a_{28} \rangle\}.$$

Для множества целей на уровне проектной организации

$$\tilde{A}_{03} = \{\langle 0,3|a_{31} \rangle, \langle 1|a_{32} \rangle, \langle 0,47|a_{33} \rangle, \langle 0,25|a_{34} \rangle, \langle 0,24|a_{35} \rangle, \langle 0,58|a_{36} \rangle\}.$$

Матрица смежностей для графа на рис. 3.6 после подстановки в нее коэффициентов связи имеет вид:

	a_{11}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	a_{28}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}
a_{11}	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0
a_{21}		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0
a_{22}			0	0	0	0	0	0	0	0,3	1	0	0	0	0
a_{23}				0	0	0	0	0	0	0,13	0	0	0	0	0
a_{24}					0	0	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0
a_{25}						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12
a_{26}							0	0	0	0	0	0	0,03	0	0
a_{27}								0	0	0	0	0	0	0,02	0
a_{28}									0	0	0	0	0	0	0,12
a_{31}										0	0	0	0	0	0
a_{32}											0	0	0	0	0
a_{33}												0	0	0	0
a_{34}													0	0	0
a_{35}														0	0
a_{36}															0

Просуммируем столбцы в матрице и полученные значения прибавим к значениям функции принадлежности к множеству «важные цели». В результате получим абсолютные веса целей проектирования (табл. 3.5).

3.5. Абсолютные веса целей проектирования

c_{11}	c_{21}	c_{22}	c_{23}	c_{24}	c_{25}	c_{26}	c_{27}	c_{28}	c_{31}	c_{32}	c_{33}	c_{34}	c_{35}	c_{36}
1	0,86	1	0,42	0,27	0,4	0,12	0,1	0,21	1,11	2	0,87	0,28	0,26	0,82

В окончательном виде нечеткое множество «важные цели» получим, если воспользуемся абсолютными весами целей проектирования, разделив их на большее из них значение. Таким значением является абсолютный вес цели c_{32} . Нечеткое множество «важные цели» имеет вид:

$$\tilde{A}_0 = \left\{ \langle 0,5 | a_{11} \rangle, \langle 0,43 | a_{21} \rangle, \langle 0,5 | a_{22} \rangle, \langle 0,21 | a_{23} \rangle, \langle 0,135 | a_{24} \rangle, \langle 0,2 | a_{25} \rangle, \langle 0,06 | a_{26} \rangle, \langle 0,05 | a_{27} \rangle, \right. \\ \left. \langle 0,101 | a_{28} \rangle, \langle 0,55 | a_{31} \rangle, \langle 1 | a_{32} \rangle, \langle 0,435 | a_{33} \rangle, \langle 0,14 | a_{34} \rangle, \langle 0,13 | a_{35} \rangle, \langle 0,41 | a_{36} \rangle \right\}$$

В соответствии со степенью принадлежности к важным целям они составляют ранжированную последовательность:

- обеспечение надежности объекта проектирования (a_{32});
- использование наиболее перспективных технических решений (a_{31});
- защита окружающей среды (a_{11});
- обеспечение заданной производительности объекта (a_{33});
- создание легкой ЩОМ, работающей в комплекте с другими легкими машинами (a_{21});
- повышение эргономических и эстетических показателей (a_{36}).

Остальные цели, имеющие абсолютный вес менее 0,5, отнесены к неосновным.

3.3.3. Автоматизированное выполнение процедуры определения целей проектирования

Программный модуль П1.2 организует на первом этапе выбор целей исследовательского проектирования на семи уровнях интересов общества в диалоге с пользователем.

На втором этапе создается матрица смежности, отражающая взаимосвязь целей проектирования.

Третий этап связан с оценкой функции принадлежности целей проектирования к подмножеству «важные цели».

На четвертом этапе определяются абсолютные веса целей проектирования на основе преобразования матрицы смежности в матрицу весов.

На рис. 3.7 представлена форма для определения целей проектирования.

Рис. 3.7. Форма программного модуля для определения целей проектирования

После загрузки программного модуля пользователь может ознакомиться с тенденциями развития техники в соответствующей ей области и требований к ней, вызвав команду: «Сценарий развития техники». По этой команде вызывается специальный файл сценария из базы знаний.

Уровни общественных интересов выбираются в соответствующем разделе с помощью кнопок выбора. Щелчок по кнопке: «Показать цели на выбранном уровне» приведет к показу множества целей, предусмотренных в базе знаний. Пользователю предоставляется возможность выбрать из этого множества, путем последовательного выделения целей, некоторое их подмножество, придавая каждой из них значение функции принадлежности в разделе: «Важность цели в долях единицы». При необходимости на каждом из выбранных уровней общественных интересов могут быть введены пользователем дополнительные цели.

По завершении выбора целей можно приступить к установлению их взаимосвязи. Выполняется это в разделе: «Установите взаимосвязь це-

лей». Щелчок по кнопке: «Ввод» приведет к циклическому показу пары целей и диалогового окна. С помощью последнего пользователь сообщает, связаны цели друг с другом или нет. После завершения цикла в программе происходит вычисление абсолютного веса целей и вывод этих значений в выделенный для этого файл в базе знаний и на экран монитора.

В качестве примера в табл. 3.6 приводятся цели проектирования, определенные с помощью программного модуля П1.2, применительно к проектированию ЩОМ для производства работ на железнодорожных путях промышленного транспорта:

3.6. Цели проектирования в ранжированной последовательности по важности

Цели проектирования	Абсолютный вес целей
Защита окружающей среды	1,0
Создание легкой машины	1,0
Обеспечение технологичности	0,86
Повышение транспортабельности машины	0,78
Обеспечение надежности	0,64
Снижение энергоемкости ОП	0,55
Обеспечение эргономичности	0,52
Улучшение условий труда	0,51
Снижение затрат на изготовление ОП	0,46
Повышение производительности труда	0,40
Внедрение объектов новой техники	0,34
Обеспечение конкурентоспособности ОП	0,3
Снижение материалоемкости ОП	0,3
Снижение уровня ручного труда	0,28
Обеспечение патентной чистоты	0,15

3.4. ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.4.1. Содержание процедуры

Под признаками объекта проектирования понимаются свойства, отличающие его от других объектов и определяющие его качество. В этой связи уместно под признаками понимать показатели качества. Полное их множество охватывает все стороны создаваемого объекта и характеризует: назначение, надежность, технологичность, безопасность работы и обслуживания, эргономичность, эстетичность, экологичность, патентную защиту и чистоту, условия эксплуатации, технический уровень, экономичность.

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

К измеряемым относятся следующие виды показателей.

Размерные:

- 1,01 — габаритные размеры всей машины и ее составных частей,
- 1,02 — зона действия рабочего органа.

Скоростные:

- 1,03 — транспортная скорость;
- 1,04 — рабочая скорость;
- 1,05 — скорость подъема и опускания рабочего органа.

Массы:

- 1,06 — конструктивная масса;
- 1,07 — общая масса;
- 1,08 — масса противовеса.

Проходимости:

- 1,09 — радиус поворота;
- 1,10 — дорожный просвет;
- 1,11 — угол въезда и съезда;
- 1,12 — давление на грунт.

К показателям, оцениваемым в баллах, относятся:

- 1,13 — тип привода;
- 1,14 — тип ходового оборудования;
- 1,15 — наличие бесступенчатого регулирования скорости;
- 1,16 — наличие элементов автоматики;
- 1,17 — способ монтажа и демонтажа.

Показатели надежности:

- 2,01 — вероятность безотказной работы;
- 2,02 — средняя наработка на отказ;
- 2,03 — интенсивность отказов;
- 2,04 — параметр потока отказов;
- 2,05 — гамма-процентный ресурс;
- 2,06 — средний ресурс;
- 2,07 — назначенный ресурс;
- 2,08 — средний ресурс между текущими (капитальными) ремонтами;
- 2,09 — средний ресурс до списания;
- 2,10 — средний ресурс до текущего (капитального) ремонта;
- 2,11 — гамма-процентный срок службы;
- 2,12 — средний срок службы;
- 2,13 — средний срок службы между текущими (капитальными) ремонтами;
- 2,14 — средний срок службы до текущего (капитального) ремонта;
- 2,15 — средний срок службы до списания;
- 2,16 — вероятность восстановления в заданное время;
- 2,17 — среднее время восстановления;
- 2,18 — гамма-процентный срок сохраняемости;
- 2,19 — средний срок сохраняемости.

Основные *показатели технологичности* распределены по шести группам.

Трудоемкость:

- 3,01 — трудоемкость изготовления изделия;
- 3,02 — трудоемкость изготовления по видам работ;
- 3,03 — трудоемкость подготовки изделия к функционированию;
- 3,04 — трудоемкость профилактического (технического) обслуживания;
- 3,05 — трудоемкость ремонта изделия.

Себестоимость:

- 3,06 — технологическая себестоимость изделия;
- 3,07 — себестоимость подготовки изделия к функционированию;
- 3,08 — себестоимость профилактического обслуживания;
- 3,09 — себестоимость ремонта изделия.

Унификация и взаимозаменяемость:

- 3,10 — коэффициент унификации изделия;
- 3,11 — коэффициент унификации конструктивных элементов;
- 3,12 — коэффициент стандартизации изделия;
- 3,13 — коэффициент повторяемости;

3,14 — коэффициент взаимозаменяемости.

Расход материала для конструктивных элементов:

3,15 — масса конструктивного элемента;

3,16 — коэффициент использования материала;

3,17 — коэффициент применимости материала.

По обработке:

3,18 — коэффициент точности обработки;

3,19 — коэффициент шероховатости поверхности.

Состав конструкции:

3,20 — коэффициент сборности;

3,21 — коэффициент перспективного использования в других изделиях.

Обработка конструкции на технологичность, в соответствии с приведенными показателями, связана со снижением трудоемкости и себестоимости ее изготовления, технического обслуживания и ремонта. Некоторые из приведенных показателей могут иметь абсолютные значения, другие — относительные и удельные.

Показатели безопасности работы и обслуживания характеризуют ряд свойств объекта, обеспечивающих активную, пассивную и аварийную безопасность. Активная безопасность включает комплекс эксплуатационных свойств, способствующих предотвращению аварийных ситуаций:

4,01 — динамические и тормозные качества;

4,02 — устойчивость против заноса и опрокидывания, против схода с рельсов;

4,03 — обзорность из кабины управления;

4,04 — обеспеченность сигнализацией и приборами;

4,05 — надежность и долговечность элементов, разрушение которых может привести к аварийной ситуации;

4,06 — обеспеченность световой и звуковой сигнализацией;

4,07 — наличие автоматических устройств безопасности, блокировки.

Пассивная безопасность обозначает свойства, благодаря которым исключается, или хотя бы снижается, вероятность травм экипажа в случае аварии:

4,08 — жесткость и прочность конструкции кабины;

4,09 — наличие конструкций, защищающих кабину от внешних нагрузок;

4,10 — предотвращение самопроизвольного открывания дверей;

4,11 — отсутствие внутри кабины выступающих частей с острыми углами и кромками, наличие предохранительных ремней;

4,12 — наличие защитных решеток на окнах.

Послеаварийная безопасность означает возможность быстрого выхода из аварийной машины и обеспечена:

4,13 — герметизацией топливных баков и топливных коммуникаций;

4,14 — наличием аварийного люка.

Признаки эргономичности:

5,01 — соответствие конструкции машины гигиеническим условиям жизнедеятельности и работоспособности,

5,02 — соответствие конструкции антропометрическим свойствам человека,

5,03 — соответствие конструкции физиологическим свойствам человека,

5,04 — соответствие конструкции психофизическим свойствам человека.

Признаки эстетичности характеризуют выразительность формы, ее соответствие господствующей моде, обеспечение целостности и гармоничности в восприятии.

Основные показатели эстетичности:

6,01 — композиционная целостность формы (гармония внешней и внутренней формы, соблюдение принципов повторяемости, равновесия);

6,02 — функциональная целостность формы (соответствие формы назначению и приспособленности ее к выполняемым функциям объекта, соблюдение принципов соподчиненности и соразмерности, принципа единства);

6,03 — товарный вид, определяемый состоянием наружной отделки.

Признаки экологичности характеризуют воздействие объекта на окружающую среду, людей, животных, растительный мир, воздушную среду.

К основным показателям экологических свойств относятся:

7,01 — уровень звука внешнего шума;

7,02 — содержание углекислого газа в продуктах сгорания топлива;

7,03 — загрязнение окружающей среды.

Признаки патентной чистоты характеризуют конструкцию объекта с точки зрения нарушения действующих в определенной стране патентов на полезные модели и промышленные образцы, а также товарные знаки. В качестве показателей патентной чистоты используются:

8,01 — коэффициент патентной чистоты;

8,02 — коэффициент патентной защиты.

Признаки, характеризующие условия эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, выражаются показателями:

9,01 — продуктивность (производительность);

9,02 — качественная работоспособность;

9,03 — ресурсопотребляемость;

9,04 — транспортабельность.

Признаки технического уровня:

10,01 — удельная металлоемкость;

10,02 — удельная энергоемкость.

Признаки экономичности:

11,01 — себестоимость;

11,02 — срок окупаемости капиталовложений.

3.4.2. Формальное описание процедуры определения признаков объекта проектирования

Цели проектирования и признаки 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 подмножества целей (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.

Для автоматизированного выполнения процедуры нужно построить полные множества целей и признаков, что должно войти в банк знаний, установить бинарные отношения между элементами этих множеств.

Соответствие признаков целям проектирования нечетко, поэтому образом $\tilde{A}_0$ в P будет нечеткое подмножество признаков $\tilde{P}_0$, определяемое выражением

$$\tilde{P}_0 = \{ \langle \mu_{\Gamma(A_0)}(p) | p \rangle \}, p \in P,$$

где $\mu_{\Gamma(A_0)}(p) = \vee (\mu_{A_0}(a) \wedge \mu_F(a, p))$; $a \in A_0$, $\mu_F(a, p)$ — функция принадлежности a и p нечеткому графику соответствия $\tilde{H} = (A_0, P_0, \tilde{F})$.

Признаки ОП, как и цели проектирования, следует ранжировать по важности. Для этого в $\tilde{P}_0$ выделим классы $\tilde{P}_0^i$ нечеткого покрытия, каждый из которых объединяет образы элементов A_0 .

В обозначении $\tilde{P}_0^i$ индекс i означает номер цели в ранжированной последовательности по важности.

Внутри каждого класса элементы расставляются в порядке убывания $\mu_{\Gamma(A_0)}(p)$, а затем классы объединяются с соблюдением порядка по i . Установить признаки объекта на данном этапе проектирования еще не означает выбрать его конструктивное решение. Признаковое пространство довольно широко и может включить множество вариантов.

Пример. Выбранные цели для проектирования ЩОМ определяют ее признаки (требуемые свойства). График соответствия основных целей и признаков представлен на рис. 3.8. Важность признака p для достижения цели a определим значением функции принадлежности пары (a, p) нечеткому графику $\tilde{F}$, представив его в виде матрицы с элементами $\mu_F(a, p)$:

$$\begin{array}{l} a_{32} \\ a_{31} \\ a_{11} \\ a_{33} \\ a_{21} \\ a_{36} \end{array} \left\| \begin{array}{cccccccccccccc} 0 & 0 & 1 & 0,8 & 0,8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,4 & 0,3 & 1 & 0 & 0,6 & 0,8 & 0,5 & 0,6 & 0,8 & 0,3 & 0,4 & 0,3 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,8 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|.$$

Нечеткое подмножество признаков при

$$\mu_{\Gamma(A_0)}(p) = \max(\min(\mu_{A_0}(a), \mu_F(a, p)))$$

имеет вид:

$$\tilde{P}_0 = \left\{ \langle 0,43 | p_1 \rangle, \langle 0,43 | p_2 \rangle, \langle 1 | p_3 \rangle, \langle 0,8 | p_4 \rangle, \langle 0,8 | p_5 \rangle, \langle 0,55 | p_6 \rangle, \langle 0,5 | p_7 \rangle, \right. \\ \left. \langle 0,55 | p_8 \rangle, \langle 0,55 | p_9 \rangle, \langle 0,3 | p_{10} \rangle, \langle 0,4 | p_{11} \rangle, \langle 0,3 | p_{12} \rangle, \langle 0,2 | p_{13} \rangle \right\}.$$

Классы нечеткого покрытия для целей в ранжированной последовательности:

$$\tilde{P}_0^{32} = \{p_3, p_4, p_5\}; \tilde{P}_0^{31} = \{p_3, p_4, p_5, p_6, p_8, p_9, p_7, p_{11}, p_{10}, p_{12}, p_{13}\}; \\ \tilde{P}_0^{11} = \{p_8, p_7\}; \tilde{P}_0^{33} = \{p_9\}; \tilde{P}_0^{21} = \{p_1, p_2\}; \tilde{P}_0^{36} = \{p_8, p_7\}.$$

Таким образом, ранжированная последовательность признаков по их важности имеет вид:

- 1) вероятность безотказной работы;
- 2) средний ресурс;



Рис. 3.8. Граф соответствия целей и признаков

- 3) глубина вырезки щебня;
- 4) качество очистки щебеночного балласта;
- 5) уровень вибрации;
- 6) производительность;
- 7) уровень шума;
- 8) удельная энергоемкость;
- 9) удельная металлоемкость;
- 10) себестоимость;
- 11) срок окупаемости;
- 12) габаритные размеры;
- 13) конструктивная масса.

3.4.3. Автоматизированное выполнение процедуры выбора признаков объекта проектирования

Программный модуль П1.3 реализует установление бинарных отношений между множеством целей и множеством признаков. Основная форма модуля представлена на рис. 3.9.

Сразу после загрузки модуля в текстовом поле раздела: «Цели проектирования» появятся цели, выбранные при выполнении предыдущей процедуры. Если цель входила во множество, предусмотренное в

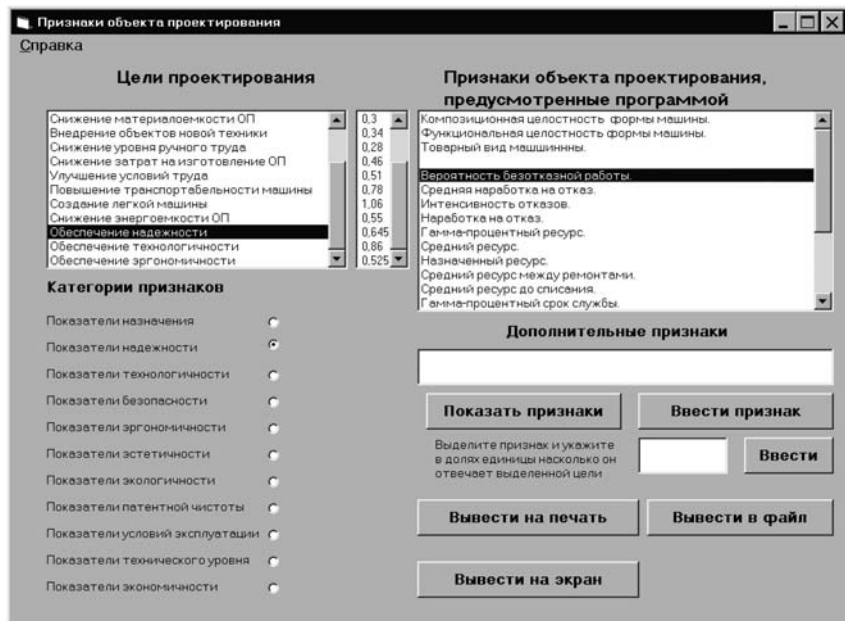


Рис. 3.9. Основная форма программного модуля П1.3

базе знаний, то по команде: «Показать признаки» в соответствующем текстовом поле появятся признаки тоже входящие в базу знаний. В противном случае пользователю надлежит для выделенной цели выбрать категории признаков с помощью кнопок выбора и по команде: «Показать признаки» вывести их в текстовое поле: «Признаки объекта проектирования, предусмотренные программой». В том и другом случае пользователь выделяет признак и в соответствующем текстовом поле вводит в долях единицы значение функции принадлежности выделенной цели и признака нечеткому графику соответствия.

Завершая работу с программным модулем, можно вывести признаки с указанием их веса по важности в соответствующий файл базы знаний, на печать или на экран монитора для просмотра.

Пример. Применение программного модуля П1.3 для определения признаков ЩОМ, отвечающих установленным ранее целям проектирования. На данном этапе выбираются лишь названия признаков, улучшением которых может быть достигнута поставленная цель. Численное значение признаков всецело зависит от класса техники. Например, та-

кой показатель, как вероятность безотказной работы для землеройной машины, существенно отличается от такого же показателя для самолета.

В текстовом поле (см. рис. 3.9) «Цели проектирования» представляются цели и их абсолютные веса, установленные при выполнении предыдущей процедуры. Первая цель «Защита окружающей среды» предусмотрена программным модулем, поэтому после подачи команды «Показать признаки» он вызывает:

- уровень звука внешнего шума;
- содержание углекислого газа в продуктах сгорания;
- загрязнение окружающей среды.

Наиболее актуальным признаком ОП для достижения цели защиты окружающей среды следует считать загрязнение, связанное с выбросом отделяемых при очистке щебня засорителей, поэтому из предлагаемых программой выбираем этот признак с указанием степени уверенности в том, что он отвечает цели, равной 1. Степень уверенности здесь представляет значение функции принадлежности признака нечеткому графику соответствия.

Следующая по порядку цель: «Обеспечение конкурентоспособности» программой не предусмотрена. На экране появляется сообщение: «Придется самостоятельно выбрать категорию и сами признаки». Достижение цели, связанной с приданием объекту проектирования конкурентоспособности, может быть обеспечено если он будет обладать признаками, относящимися практически ко всем категориям. Так, из категории: «Показатели назначения» выбираем признаки, представленные нижеприведенным списком. В нем в скобках указана степень уверенности в соответствии признака рассматриваемой цели:

- общая масса машины (0,9);
- наличие элементов автоматики (1,0).

Признак «Общая масса машины» выбран в связи со стремлением создать легкую ЩОМ для работы на железнодорожных путях промышленного транспорта. Признак: «Наличие элементов автоматики» — неотъемлемое свойство современных машин.

Из категории: «Показатели надежности» для обеспечения конкурентоспособности объекта проектирования выбраны признаки:

- вероятность безотказной работы (1,0);
- средний срок сохраняемости (0,8).

Вероятность безотказной работы — весьма важный признак для машин, работающих в комплекте и обслуживающих последовательную цепочку операций. В этом случае отказ, наступивший у одной из машин, приводит к потере работоспособности всего комплекта. Срок сохраняе-

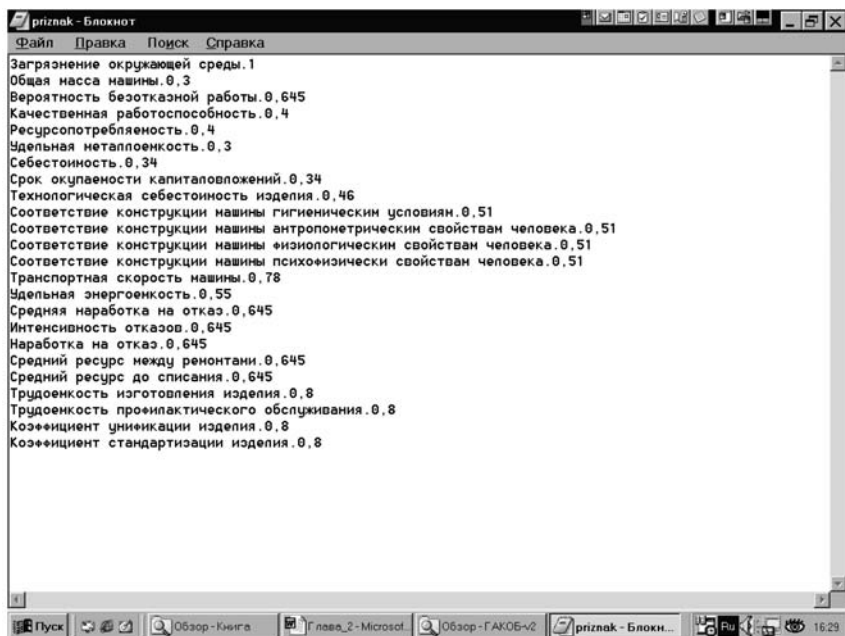


Рис. 3.10. Признаки объекта проектирования

мости учтен в связи с тем, что путевые машины имеют сезонное применение и длительное время находятся в режиме ожидания. Машина не должна за это время потерять свою работоспособность. Степень уверенности 0,8 означает, что принимающий решение не вполне уверен в соответствии этого признака цели обеспечения конкурентоспособности.

На рис.3.10 представлен список признаков объекта проектирования, полученный с использованием программы П1.3.

3.5. ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В исследовательском проектировании выбор целей, признаков объекта проектирования, его параметров должен производиться с учетом того, что за время с момента начала разработки до ее завершения могут произойти изменения в сфере факторов окружения объекта. Для того чтобы создаваемая машина не оказалась морально устаревшей, выйдя из сборочного цеха, и цели, и признаки, и параметры должны прогнозироваться.

Рассматривая каждый фактор как объект, следует подобрать к нему наиболее соответствующий метод прогнозирования. Классификация их проводится по шести признакам [30].

1. По природе 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. По 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. По сложности объекта прогнозирования:

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. По 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. По характеру 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. По 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. Рекомендации для однозначного выбора метода прогнозирования не разработаны. В табл. 3.7 представлены наиболее распространенные методы прогнозирования и позиции по шести классификационным признакам, характеризующим объект.

3.7. Классификация методов прогнозирования

Метод прогнозирования	Объект прогнозирования					
	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

Продолжение табл. 3.7

Метод прогнозирования	Объект прогнозирования					
	1	2	3	4	5	6
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	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
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

Окончание табл. 3.7

Метод прогнозирования	Объект прогнозирования					
	1	2	3	4	5	6
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
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 отнесенная 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
Экстраполяция факторов	а, б, в, д	в, г, д	в, г	б	б	а
Биологические модели роста	а, б	а	а	а, д	б	б

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 [41]. Введем понятие коэффициента общности метода прогнозирования:

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

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

Наибольшим коэффициентом общности обладает метод коллективного экспертного опроса (20 позиций из 24). Все методы, имеющие отношение к опросу экспертов, обладают высоким значением этого показателя. Из других методов прогнозирования с большой общностью можно выделить метод «Дельфи» и морфологический анализ.

Среди всех методов определенную группу объединяет инженерное прогнозирование [16]. Оно опирается на информацию, содержащуюся в законченных проектных и научно-технических разработках, в патентах. Прогнозирование, распространяющееся на 2 — 4 года, считается краткосрочным, на 5 — 15 лет — среднесрочным, на 15 — 30 лет — долгосрочным, на срок более 30 лет — сверхдолгосрочным.

Инженерное прогнозирование — научно обоснованная информация, определяющая в вероятностной постановке потенциальные возможности техники. Охватывает оно срок до 15 лет и способно дать оценку перспективности, как отдельного объекта, так и целого технического направления.

Методы инженерного прогнозирования весьма разнообразны, но в основе их лежит небольшое число принципов: экспертный опрос, экстраполяция, морфологический анализ, математическое моделирование.

Источники информации и виды прогнозов на их основе представлены на рис. 3.11.

Экспертный опрос строится на использовании мнений специалистов. Результаты опроса обрабатываются средствами математической статистики, при этом возможен учет квалификации специалистов. Экспертный опрос применим ко всем видам прогнозирования.

Экстраполяция при прогнозировании заключается в переносе закономерностей развития техники из прошлого в будущее. Здесь различают статические и динамические задачи. Статическая задача связана с определением одного какого-либо значения прогнозируемого при-



Рис. 3.11. Источники информации для прогнозирования

знака объекта по ранее установленным величинам других признаков. Уравнение регрессии, связывающее значение случайных величин для статической задачи:

$$y - \bar{y} = a_1 (x_1 - \bar{x}_1) + a_2 (x_2 - \bar{x}_2) + \dots + a_n (x_n - \bar{x}_n), \quad (3.1)$$

где y — значение прогнозируемого признака; $\bar{y}$ — среднее значение признака за ретроспективный период; $a_1, a_2, \dots, a_n$ — коэффициенты уравнения регрессии; $x_1, x_2, \dots, x_n$ — известные значения прогнозных признаков; $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ — средние значения признаков в ретроспективный период.

Значения коэффициентов регрессии можно установить, подставив в уравнение (3.1) значения y , $\bar{y}$ и $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, x_1, x_2, \dots, x_n$, известные к настоящему времени.

Динамическая задача экстраполяции связывает значение прогнозируемого признака со временем. Уравнение регрессии имеет вид

$$y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n,$$

где $a_0, a_1, \dots, a_n$ — коэффициенты уравнения регрессии; t — время.

Морфологический анализ связан с разделением задачи на составные части в соответствии с определенными характеристиками объекта прогнозирования (надежностью, технологичностью, эргономичностью, эстетичностью, экономичностью, научной обоснованностью и др.). Характеристики подразделяются на позиции в нарастающем смысловом значении. И характеристики, и позиции получают оценки. Характеристики оцениваются в долях единицы. Чем выше оценка, тем важнее характеристика. Оценку дают эксперты. Возможны два подхода. При первом эксперты напрямую назначают оценку, при втором — они лишь расставляют характеристики в ранжированной последовательности по важности, а оценка определяется по нормирующей функции:

$$\varphi_i = \frac{i}{2^{i-1}},$$

где i — номер характеристики в ранжированной последовательности.

Позиции оцениваются в баллах в соответствии с их местом в списке. Характеристики, позиции с указанием их оценок сводятся в Генеральную определительную таблицу (ГОТ). Фрагмент ГОТ представлен в табл. 3.8.

3.8. Фрагмент ГОТ

Код	Характеристики и позиции	Оценки	
		c_j	c_{j0}
p_1	Техническое решение не удовлетворяет ни одному из составляющих надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость)	1	0,75
p_2	Техническое решение удовлетворяет одной из составляющих надежности	2	1,5

Окончание табл. 3.8

Код	Характеристики и позиции	Оценки	
		c_j	c_{j0}
p_3	Техническое решение удовлетворяет двум из составляющих надежности	3	2,25
p_4	Техническое решение удовлетворяет трем из составляющих надежности	4	3,0
p_5	Техническое решение удовлетворяет всем составляющим надежности	5	3,75

Примечание: c_j — оценка позиции; c_{j0} — окончательная оценка, равная $c_j \varphi_i$; надежность $\varphi_i = 0,75$.

С помощью ГОТ можно определить перспективность отдельного технического решения. Для этого для него находятся соответствующие позиции по всем характеристикам и подсчитывается коэффициент инженерно-технической значимости, равный

$$\tau = \frac{q}{Q},$$

где q — сумма окончательных оценок по всем характеристикам ГОТ; Q — сумма наибольших оценок по всем характеристикам ГОТ. Для данной ГОТ Q — величина постоянная.

Используя коэффициент инженерно-технической значимости, можно установить перспективность технического решения с помощью шкалы, приведенной в табл. 3.9.

3.9. Перспективность технических решений

τ	Перспективность
1...0,8	Техническое решение весьма перспективно
0,8...0,6	Техническое решение перспективно
0,6...0,4	Техническое решение мало перспективно
< 0,4	Техническое решение неперспективно

Перспективность целого научно-технического направления определяется по приведенному числу патентов, которое выражается следующей зависимостью:

$$N_A = \sum_{i=1}^n \tau_i,$$

где n — число патентов по научно-техническому направлению A ; τ_i — коэффициент научно-технической значимости патента i по направлению A .

Таким образом, перспективность того или иного научно-технического направления оценивается суммой коэффициентов научно-технической значимости всех патентов, выданных по этому направлению за некоторый ретроспективный период, например за последние 15 лет. Наиболее перспективным следует считать направление, имеющее наибольшее значение приведенного числа патентов.

Пример. В 1990 г. на кафедре строительных и дорожных машин ЛИИЖТа был сделан прогноз развития щебнеочистительной техники. Использовался морфологический анализ, в результате которого стало возможным сделать следующие выводы.

Наибольшее приведенное число патентов оказалось у механического способа очистки. Это свидетельствовало о том, что он еще не исчерпал свои возможности. Однако из всех рассмотренных технических решений самый большой коэффициент инженерно-технической значимости оказался у предложения, связанного с пневматическим способом очистки.

Вероятные пропорции внедрения изобретений составили: у механического — 0,79, у пневмомеханического — 0,21.

Таким образом, в 1990 г. был сделан вывод, что механический способ очистки наиболее вероятен у вновь создаваемых машин, однако можно ожидать появление и пневмомеханического способа, не исключено применение промывки.

Со времени составления прогноза прошло более двадцати лет. До сих пор выпускаемые машины очищают щебеночный балласт механическим способом. Конструктивные решения, использующие пневмомеханический способ очистки, так и остаются нереализованными.

Глава 4

ПРОЦЕДУРЫ НА СТАДИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ

4.1. ПОИСК ВАРИАНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Техническое предложение — это совокупность конструкторских документов, разработанных на основе ТЗ 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 нашей стране, 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 стадии его разработки (см. рис. 2.2) выделено три основные процедуры: поиск вариантов технических решений, выбор оптимального варианта и анализ принятого решения.

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. Здесь проявляются способности конструктора к изобретательству. Как известно, к изобретательству наиболее склонны люди с хорошо развитым ассоциативным мышлением. 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. Разгадка механизма творчества — задача 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». 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.

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. Специалисты в области изобретательского дела понимают под «обычным проектированием» проектирование нового образца внутри типоразмерного ряда. Действительно, в этом случае конструктор мо-

жет 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. На практике не всегда вся целиком разработка может быть признана изобретением. Изобретение обычно скрыто в разработке, его надо уметь найти.

Несомненно, 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 определено сулит положительный эффект и может быть реализовано. Конечно, такое противоречие в целях не противопоставляет конструктора изобретателю. Профессии изобретателя нет. 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.

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.

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 тре-

тью. 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 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. Перечень эвристических приемов, названный межотраслевым фондом. Всего он содержит 258 приемов, объединенных в 15 групп [1]. 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.

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 [1].

Метод поиска технических решений с помощью эвристических приемов отражает идею «общего решателя задач»: имеется некоторый объект (прототип), к которому применяется преобразование (эвристический прием), после чего полученный результат сравнивается с целевым.

Метод гирлянд ассоциаций используется, когда цель проектирования определяет единственный признак объекта — новизну. 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 на практике 10—15 % комбинаций составляют интересные идеи [1].

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 допускаются. Основной девиз — чем больше идей — тем лучше. Если в ходе сеанса, по мнению руководителя, высказано мало идей, то он может быть повторен с тем же или с другим составом специалистов. Все высказывания стенографируются или записываются на магнитную ленту.

Правило отказа от критики во время мозгового штурма способствует поиску технических решений.

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 отыскивать реальные технические решения, рекомендуется пофантазировать, представить 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, когда выполнялась процедура определения потребности проектирования. Если же все-таки нужно что-то создавать, то лучше это сделать самым «простым» образом.

Идеальным объектом для перемещения мог бы служить ковер-самолет, для обслуживания посетителей в заведениях общественного питания — скатерть-самобранка. Если стремиться к летательному

средству наподобие ковра-самолета, то можно прийти к реактивному ранцу, что уже и применялось. Идеальным грузовым автомобилем можно считать такой, у которого весь его объем занимает кузов. Проследив исторически изменение конструкции грузовых автомобилей, можно заметить движение к такому идеалу.

Выбрав идеальный объект или идеальный 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. В табл. 4.1 представлена форма, удобная для разработки вариантов проектируемого объекта. В ней указываются общая и частные функции, а также средства выполнения частных функций. При этом

$$x_k = \bigcap_{i=1}^n u_{ij}; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, l_i}; \quad x_k \in X; \quad u_{ij} \in U_i,$$

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.

Морфологический анализ — весьма действенный метод. В этом убеждает проведение занятий со студентами по дисциплине «Технические основы создания машин» в Петербургском государственном университете путей сообщения.

По этой дисциплине предусмотрена курсовая работа. Она построена на разработке технического предложения. В качестве объекта проектирования студентам предлагается уже упоминавшаяся машина для очистки щебеночного балласта. Курсовая работа выполняется на

4.1. Таблица разработки вариантов технического решения

Вариант	Общая функция Y										
	Частная функция y_1				Частная функция y_2				Частная функция y_n		
	u_{11}	u_{12}	...	u_{1l_1}	u_{21}	...	u_{1l_2}	...	u_{n1}	...	u_{nl_n}
1		1					1	...	1		
2	1				1			...			1
...											
m				1			1	...	1		

третьем курсе. Большинство студентов к этому времени еще не знакомы с путевыми машинами. К тому же от них требуется предложить конструкцию легкой путевой машины для работы на железнодорожных путях промышленного транспорта, а такой машины в нашей стране пока не производилось. В этих условиях студентам трудно предложить техническое решение без использования какого-либо метода. Опыт показал, что наиболее действенным методом поиска технических решений оказывается морфологический анализ. На практическом занятии выясняется вместе со студентами общая функция машины — удаление засорителей из щебеночного балласта, а также частные функции: вырезка засоренного балласта, перемещение его к месту очистки, отделение засорителей, перемещение очищенного балласта к месту укладки, перемещение засорителей, рабочее перемещение машины. Теперь уже, отвлекаясь от машины в целом, студентам значительно проще предложить средства реализации частных функций. Компонуя в дальнейшем схему машины за счет сочетания различных средств реализации частных функций, они получают ее варианты. Общее их количество составляет:

$$N_{\sigma} = \prod_{i=1}^n k_i,$$

где n — число частных функций; k_i — число средств реализации частной функции i .

Если учесть, что число частных функций равно шести, а для реализации каждой из них обычно предлагается не менее пяти средств, то

общее количество вариантов достигает 15 тысяч. Это делает возможным выдавать всем студентам, даже если их число в потоке составляет 50 и более человек, одно задание. При этом каждый студент должен предложить не менее десяти различных вариантов и выбрать из них лучший. В конце семестра преподаватель имеет возможность назвать лучшее техническое решение.

Пример. Поиск вариантов технического решения ЩОМ для промышленного транспорта. Общая функция ЩОМ $Y = \langle \text{удаление засорителей из железнодорожного балластного слоя} \rangle$. В примере сокращено и число частных функций, и число средств их реализации. Ограничимся рассмотрением вариантов, способных работать при сыпчатой путевой решетке.

Частные функции:

- y_1 — вырезка загрязненного балласта;
- y_2 — перемещение балласта к месту очистки;
- y_3 — очистка балласта;
- y_4 — укладка очищенного балласта в путь;
- y_5 — перемещение загрязнителей;
- y_6 — перемещение машины.

В качестве средств реализации частных функций выбраны:

- по y_1 : u_{11} — подрезной нож; u_{12} — шнек; u_{13} — ковш; u_{14} — фреза;
- по y_2 : u_{21} — ленточный транспортер; u_{22} — многоковшовый цепной рабочий орган; u_{23} — роторный многоковшовый рабочий орган; u_{24} — без применения специальных устройств;
- по y_3 : u_{31} — центробежный грохот; u_{32} — плоский виброгрохот; u_{33} — барабанный грохот;
- по y_4 : u_{41} — наклонный лоток; u_{42} — ленточный транспортер;
- по y_5 : u_{51} — выброс за счет центробежных сил; u_{52} — ленточный транспортер; u_{53} — наклонный лоток;
- по y_6 : u_{61} — на гусеничном ходу; u_{62} — на пневмоходу.

Для удобства выбора и представления вариантов воспользуемся морфологической таблицей (табл. 4.2). В ней каждый вариант занимает строку. Формируется вариант по правилу: все частные функции должны выполняться, каждая функция реализуется тем или иным средством. Используемые в варианте средства помечены единицей. Проставлять единицы лучше всего случайным образом. Тогда могут появиться неожиданные варианты. В таблице помечены лишь пять возможных вариантов, хотя их общее количество равно произведению числа средств по всем частным функциям. В данном примере это количество равно 576. И хотя не все сочетания средств могут быть реализо-

4.2. Морфологическая таблица

Вари- ант	Y																	
	y ₁				y ₂				y ₃			y ₄		y ₅			y ₆	
	u ₁₁	u ₁₂	u ₁₃	u ₁₄	u ₂₁	u ₂₂	u ₂₃	u ₂₄	u ₃₁	u ₃₂	u ₃₃	u ₄₁	u ₄₂	u ₅₁	u ₅₂	u ₅₃	u ₆₁	u ₆₂
	1	1						1		1		1				1	1	
2		1				1				1		1				1	1	
3	1					1					1	1				1	1	
4				1				1	1			1		1				1
5			1			1				1		1				1		1

ваны конструктивно, все же морфологическая таблица открывает широкое поле деятельности проектировщику.

Схемы выбранных вариантов представлены на рис. 4.1.

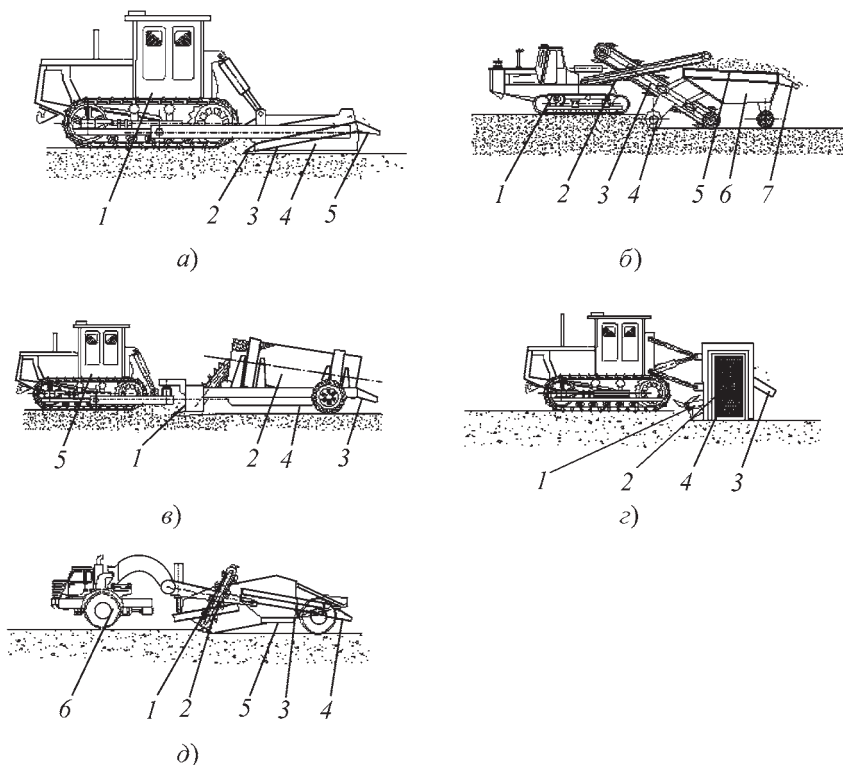


Рис. 4.1. Варианты щебнеочистительной машины:

а — вариант 1: 1 — гусеничный трактор; 2 — подрезной нож; 3 — плоский вибропрохот; 4 — лоток для загрязнителей; 5 — лоток для очищенного щебня; *б* — вариант 2: 1 — гусеничный трактор; 2 — ленточный транспортер; 3 — цепной многоковшовый рабочий орган; 4 — шнек; 5 — плоский вибропрохот; 6 — лоток для загрязнителей; 7 — лоток для очищенного щебня; *в* — вариант 3: 1 — подрезной нож; 2 — барабанный прохот; 3 — лоток для очищенного щебня; 4 — лоток для загрязнителей; *г* — вариант 4: 1 — подрезной нож; 2 — барабанный прохот; 3 — лоток для очищенного щебня; 4 — лоток для загрязнителей; *д* — вариант 5: 1 — ковш; 2 — многоковшовый рабочий орган; 3 — плоский вибропрохот; 4 — лоток для очищенного щебня; 5 — лоток для загрязнителей; 6 — пневмоколесный тягач

4.2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОИСК ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Поиск технических решений относится к интеллектуальной деятельности человека, а попытки ее автоматизации приводят в область одного из направлений создания искусственного интеллекта, называемого экспертные системы (ЭС). Экспертная система это программа, позволяющая решать задачи в конкретной области знаний на уровне эксперта (квалифицированного специалиста). В проектировании опытному специалисту ЭС может напомнить о том, что он не должен забыть и помочь расширить круг поиска технических решений, а начинающему — дать возможность ознакомиться с тем, как может быть решена экспертом.

Экспертные системы нашли применение в медицине для диагностики заболеваний, в геологии для нахождения мест залегания полезных ископаемых, в военном деле. В исследовательском проектировании они имеют пока опытное применение. Некоторые из них дают полезные для практики и особенно для обучения результаты.

Главная особенность ЭС заключается в способе формального представления знаний. Знание в самом широком представлении есть проверенный практикой результат познания действительности, верное ее отражение в мышлении человека. К знаниям можно отнести: факты, правила, аксиомы, теоремы, теории, законы и т.п. В настоящее время основными способами формального представления знаний выступают логические модели, продукционные правила, фрейм, семантические сети.

Логические модели реализуются на языках исчисления высказываний и предикатов. Представление знаний на языке исчисления высказываний уже было использовано в процедуре определения потребности проектирования. Там для ответа на вопрос надо или нет развертывать процесс проектирования исчислялась истинность сложного высказывания, составленного из элементарных с применением логических операций.

Предикат — это высказывание, содержащее множество переменных.

Исчисление предикатов лежит в основе программ, составленных на алгоритмическом языке ПРОЛОГ. Для иллюстрации представления знаний с использованием языка ПРОЛОГ рассмотрим пример. Пусть имеем в базе знаний две аксиомы:

- все машины имеют двигатель;
- грохот — машина.

На основании этих аксиом доказывается теорема — грохот имеет двигатель. Для непосвященного в строительные машины человека

утверждение о том, что «грохот» имеет двигатель, изначально не было очевидным.

Представим теперь базу знаний и вопрос, обращенный к ней на языке ПРОЛОГ:

имеет_двигатель (X):— машина (X).

машина (грохот).

— имеет_двигатель (грохот)

Каждый оператор программы ПРОЛОГ представляет собой предложение (предикат). Предложение в общем случае имеет «голову» и «тело», разделенные знаком «:— », а в частности — только голову или только тело. Предложение, содержащее только голову, называется фактом, только тело — вопросом или целью. Работа программы заключается в установлении истинности вопроса. Основные данные в ПРОЛОГЕ представлены на рис. 4.2.

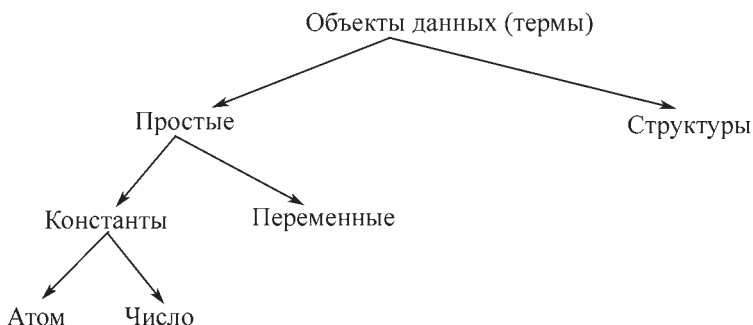


Рис. 4.2. Типы данных в ПРОЛОГе

Атомы обозначаются одним или цепочкой символов, начинающихся со строчной буквы или любым набором символов, помещенным между апострофами. Например: *анна*, *n1*, *студент_Иванов*, *'23'*.

Переменные обозначаются одним или цепочкой символов, начинающихся с прописной буквы или со знака подчеркивания. Например: *Анна*, *_анна*, *X*, *У34*.

Структуры состоят из функтора и компонент. Например: дата (25, мая, 2009). Здесь «дата» — функтор, данные в скобках — компоненты. Количество компонент определяет размерность структуры (арность). Функтор обозначается как атом. Компоненты представляют любые типы данных.

Основным механизмом работы программы является сопоставление данных. Основные правила сопоставления:

1. Константы, обозначим их S и T , сопоставимы, если они идентичны. Например, константа «15» сопоставима только с константой «15».

2. Если S — переменная, а T — произвольный терм, то они сопоставимы, и S — принимает значение T . Например, переменная « X » сопоставима с константой «15» и принимает значение «15».

3. Если S и T — структуры, то они сопоставимы при условии, что они имеют одинаковые функторы, а их компоненты сопоставимы. Например, структура «дата(Д, М, Г)» сопоставима со структурой «дата(25, мая, 2009)», так как эти структуры имеют одинаковые функторы, одинаковую размерность и сопоставимые компоненты.

На вход программы подается вопрос. Система сопоставляет вопрос с головными частями предложений. Если среди них найдется такое, головная часть которого сопоставима с вопросом, а тело имеет истинное значение, то на выходе программы оказывается утверждение «Да», как ответ на поставленный вопрос. В противном случае ответом будет «Нет».

В приведенном примере программе задается вопрос: ? — имеет двигатель (грохот). Этот вопрос в ходе выполнения программы сопоставляется с головой первого предложения. Оба объекта и вопрос и голова предложения — сопоставимые структуры. Они имеют одинаковые функторы, размерность и сопоставимый компонент. Переменная X принимает значение «грохот». Значение переменной распространяется на все предложение. Теперь его тело имеет выражение: «машина (грохот)». Для завершения работы программы необходимо установить истинность тела. В роли вопроса оно сопоставляется со вторым предложением и оказывается с ним сопоставимым. Второе предложение представляет собой факт, а факт всегда истинен. Таким образом, в результате работы программы найдено предложение, голова которого сопоставима с вопросом, а тело имеет истинное значение. Результат работы программы: «Да», т.е. грохот имеет двигатель.

Логическое представление знаний с использованием алгоритмического языка ПРОЛОГ имеет строгий согласованный характер. Это обстоятельство становится существенным препятствием для представления независимых друг от друга знаний в конкретной предметной области. Продукционные правила, как форма представления знаний, имеют в некоторых отношениях сходство с логикой предикатов, однако им присуща полная независимость знаний. Продукционные правила описывают знания в форме ЕСЛИ — ТО. ЕСЛИ — это условная

часть правила, ТО — констатирующая. Продукционные правила помещаются в БЗ экспертной системы. Механизм вывода содержит рабочую память для накопления данных, полученных в результате обработки запроса пользователя. Вывод, как и в логической системе построен на сопоставлении данных в рабочей памяти и БЗ. Данные, содержащиеся в рабочей памяти, сопоставляются с условными частями правил. Если они оказываются сопоставимыми (совпадающими), то констатирующая часть этих правил заносится в рабочую память. Сопоставление продолжается до тех пор, пока не прекратится поступление данных в рабочую память.

Пример. Необходимо узнать, каким рабочим органом следует воспользоваться для вырезки засоренного щебеночного балласта железнодорожного пути с целью его дальнейшей очистки. К тому же эта работа должна быть выполнена по технологическому процессу капитального ремонта пути под номером один.

Пусть в БЗ находится два правила:

ЕСЛИ:	1) очистка щебня,
	2) не снимать путевую решетку,
ТО:	использовать выгребную цепь;
ЕСЛИ:	первый технологический процесс,
ТО:	не снимать путевую решетку.

Помещаем в рабочую память запрос:

очистка щебня
первый технологический процесс

Первое сопоставление данных рабочей памяти с БЗ обнаружило совпадение одного из них (первый технологический процесс) с условной частью второго правила. Констатирующая часть этого правила помещается в рабочую память:

очистка щебня
первый технологический процесс
не снимать путевую решетку

Новое сопоставление обнаруживает, что в рабочей памяти есть данные, совпадающие с условной частью первого правила. Его констатирующая часть помещается в рабочую память:

очистка щебня
 первый технологический процесс
 не снимать путевую решетку
 использовать выгребную цепь

Последующее сопоставление не приносит новых данных в рабочую память. Работа программы завершается. Для создаваемой машины следует использовать выгребную цепь.

Семантические сети используются в тех случаях, когда нужно представить некоторые сущности (объекты, понятия, события, процессы, явления и др.) и отношения между ними. Сущности отображаются вершинами сети, а отношения — дугами. Если вершины не имеют собственной структуры, то семантические сети считаются простыми. В противном случае образуются иерархические сети. Семантические модели имеют широкое применение. Например, знания идентифицирующие экскаватор, могут быть представлены семантической моделью, изображенной на рис. 4.3.

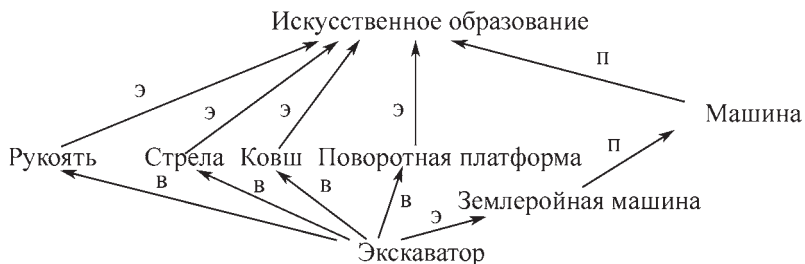


Рис. 4.3. Пример семантической модели

Дуги на сети помечены. Метка «э» означает элемент множества. В частности, экскаватор есть элемент множества землеройных машин. Метка «п» означает подмножество, так землеройные машины образуют подмножество машин вообще, а «в» обозначает отношение включения, т.е. экскаватор включает рукоять, стрелу, ковш, поворотную платформу.

Наиболее подходящей моделью представления знаний в ЭС для решения задач поиска технических решений можно считать фреймовую, как пригодную для описания некоторых стандартных ситуаций. Стандартность ситуации для представления знаний об объектах техники в той или иной области состоит в том, что можно заранее определить общую и частные функции объектов. Слоты фрейма заполняются средствами достижения частных функций. Для каждого из них в свою очередь тоже можно определить общую и частные функции. Таким образом, создается многоуровневый фрейм, описывающий все множество вариантов технического решения.

Удобнее всего представить фрейм в виде И-ИЛИ дерева. Вершины его означают общую и частные функции, а также средства реализации частных функций. Вершины «И» помечаются знаком конъюнкции. Вершины «ИЛИ» — знаком дизъюнкции. Вершины, как средства реализации частных функций, помечаются точкой (конечные вершины). Пример представления некоторого множества вариантов технического решения в виде И-ИЛИ дерева представлен на рис. 4.4.

Вершина 0 означает общую функцию. Вершины $1, 2, \dots, m$ — частные функции. Вершины i, j ($i = 1, m; j = 1, n_m$), помеченные точкой, отображают средства реализации частных функций.

Каждый вариант технического решения на И-ИЛИ дереве описывается комбинацией вершин некоторого поддерева.

Вершины И-ИЛИ дерева включаются в комбинацию на основе следующих правил.

Корневая вершина, означающая общую функцию объекта проектирования, всегда включается в комбинацию.

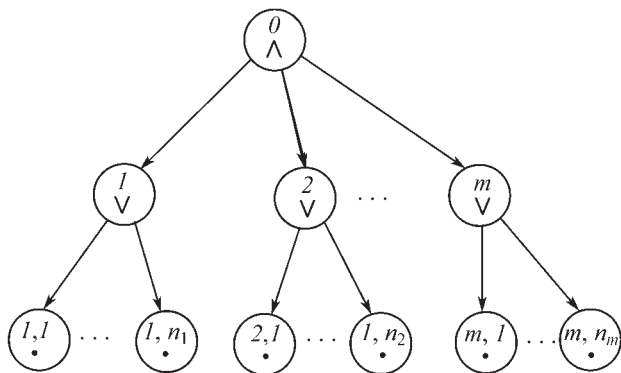


Рис. 4.4. И-ИЛИ дерево

Вершины, имеющие предшественником вершину И, также всегда включаются в комбинацию.

Вершина, имеющая предшественником вершину ИЛИ, включается в комбинацию, если сам предшественник уже вошел в комбинацию, и выполняются какие-либо условия. Например, на вершину пал случайный выбор или вершина обладает некоторыми необходимыми свойствами.

Мощность множества комбинаций, отличающихся хотя бы одной вершиной на И-ИЛИ дереве, равна:

$$N = \prod_{i=1}^m n_i,$$

где n_i — количество средств реализации частной функции i .

Из всего множества комбинаций необходимо выбрать такие, которые, во-первых, включают непротиворечивые средства достижения частных функций, а во-вторых, лучшим образом отвечают признакам объекта проектирования (ОП), связанным с целями проектирования. Цели и признаки ОП должны быть определены ранее в ТЗ, составляя концептуальное его описание.

Для исключения несовместимых комбинаций в БЗ включаются специальные правила в виде составных высказываний, типа:

$$A \rightarrow B; A \rightarrow \neg B; A \vee B \rightarrow \neg C; A \wedge B \rightarrow \neg C \wedge \neg B \text{ и др.,}$$

где A, B, C — простые высказывания, означающие применение того или иного средства реализации частной функции.

Допустимыми комбинациями будут те, для которых истинны составные высказывания. Эти комбинации и определяют варианты технического решения ОП. Каждый из этих вариантов в разной степени отвечает требуемым признакам. Будем полагать, что объект проектирования отвечает тому или иному признаку, если этому признаку отвечают все входящие в него средства реализации частных функций. Ответ средства на тот или иной признак может быть положительным, что означает улучшение ОП, отрицательным — ухудшение ОП по этому признаку и безразличным, т.е. средство не характеризуется этим признаком.

Учитывая неполноту информации об ОП на начальных стадиях проектирования, отношение между множеством средств реализации частных функций и множеством признаков нечетко. Это отношение можно представить нечетким гиперграфом $H = (U, P, \tilde{F})$. Его вершины означают средства реализации частных функций ОП $U = \{u_{ij}\}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, а ребра $P = \{p_s\}$, $s = \overline{1, r}$ — признаки. Нечеткий предикат $\tilde{F}$ устанавливает степень инцидентности вершин и ребер, принимая значение $\mu_F < u_{ij}, p_s >$ из интервала $[-1, 1]$. Граничные значения $\mu_F < u_{ij}, p_s >$ (-1 и 1) означают, что средство u_{ij} соответственно четко

ухудшает или четко улучшает показатели ОП по признаку p_s . Значение $\mu_F < u_{ij}, p_s > = 0$ свидетельствует о том, что средство u_{ij} не характеризуется признаком p_s . Промежуточные значения отражают степень улучшения (положительные значения) или ухудшения (отрицательные значения) ОП по данному признаку.

Подводя итоги представления БЗ, отметим ее основные компоненты:

1) И-ИЛИ дерево, содержащее описание всего множества вариантов технического решения в виде общей и частных функций, а также средств реализации последних;

2) правила, исключающие несовместимые средства;

3) гиперграф отношения между средствами реализации частных функций и признаками объекта проектирования.

Учитывая многочисленность вариантов технического решения, отражаемых И-ИЛИ деревом, для выбора лучшего из них следует воспользоваться пошаговой оптимизацией. На каждом шаге отбирается средство реализации частной функции, не нарушающее правила совместимости и имеющее наибольшее значение обобщенного показателя качества $K_{ij} = \sum_{s=1}^r d_s \mu_F < u_{ij}, p_s >$, где d_s — вес признака как оценка

его важности. При наличии нескольких равнозначных средств формируется столько же равнозначных вариантов технического решения.

Следуя приведенному алгоритму, из множества возможных вариантов технического решения на И-ИЛИ дереве будут отобраны те из них, которые в большей степени отвечают заданным в концептуальном описании признакам.

Этот алгоритм реализован в экспертной системе, названной ЭКОН-1.0 (Эксперт КОНструктор, версия 1.0). Головная форма ЭКОН-1.0 представлена на рис. 4.5.

ЭКОН-1.0 по существу является оболочкой, наполняемой знаниями применительно к конкретной области техники.

Ввод/редактирование данных используется для наполнения оболочки знаниями. Делает это инженер по знаниям на основе опроса экспертов. При выборе этого вида работ открывается после ввода пароля форма, представленная на рис. 4.6.

По команде *«Ввод/редактирование наименований вершин и признаков»* формируется множество вершин И-ИЛИ дерева из общей и частных функций ОП, а также из средств реализации частных функций. Здесь же создается множество признаков для данной области техники.

По команде *«Ввод/корректировка данных в таблице соответствий»* создается таблица, отражающая инцидентность признаков и средств

Главной монитор экспертной системы ЭКОН-1.0

Раздел знаний

Выберите вид работы

Ввод/редактирование данных в базе знаний

Генерация решений

Изменение раздела знаний

Конец работы с системой

Рис. 4.5. Главная форма ЭКОН-1.0

Ввод/редактирование данных в базе знаний

Раздел знаний

Выберите вид работы

Ввод/редактирование наименований вершин и признаков ОП

Ввод/корректировка данных в таблице соответствий

Создание/корректировка графа ОП

Создание правил

Проверка введенной информации на корректность

Выход в главное меню

Рис. 4.6. Форма для создания базы знаний

реализации частных функций. По команде «Создание/корректировка графа ОП» заполняется матрица смежностей вершин И-ИЛИ дерева.

По команде «Создание правил» вводятся правила, исключающие использование несовместимых средств реализации частных функций. По команде «Проверка введенной информации на корректность» производится проверка введенных правил на наличие взаимоисключающих высказываний и таблицы инцидентности на наличие противоречивых данных.

Вид работы «Генерация решений» в головной форме (см. рис. 4.5) выбирается пользователем системы для запуска механизма поиска вариантов технического решения. На рис. 4.7 представлена форма генерации решений.

Под созданием концептуального описания подразумевается выбор из полного множества признаков некоторого подмножества, отвечающего множеству целей проектирования. При этом выбранные признаки группируются в классы. Каждому классу присваивается вес в пределах от 1 до 99 в соответствии с важностью признаков.

Ввод исходных данных используется в тех случаях, когда имеются некоторые начальные условия для выбора вариантов технического ре-

Рис. 4.7. Форма для генерации решений

нения. Так, например, исходными данными при поиске вариантов щебнеочистительной машины являются условия: работа машины происходит без снятия или при снятой путевой решетке.

По команде *«Генерация решений»* ЭКОН-1.0 запускает механизм поиска решений, действуя по пошаговому алгоритму. По команде *«Печать результатов»* предоставляется возможность просмотреть или распечатать описание вариантов, включающего частные функции ОП и средства их реализации. Число предложенных системой вариантов может быть больше одного. При этом чем больше используется признаков в концептуальном описании ОП, тем меньше оказывается равнозначных вариантов.

Вид работы *«Объяснение принятого решения»* используется пользователем для выяснения того, почему система выбрала предлагаемые ею варианты.

Команда *«Изменение раздела знаний»* в головной форме служит для выбора БЗ, содержащейся в ЭКОН-1.0, и соответствующей той области техники, в которой намерен работать пользователь.

Экспертная система ЭКОН-1.0 способна обучаться. Обучение ее осуществляется инженером по знаниям путем ввода новых правил.

Экспертная система ЭКОН-1.0 использовалась для поиска вариантов технического решения щебнеочистительной машины, для устройств по очистке масла в гидросистеме экскаватора, для компоновки привода ходовой тележки путевой машины, для проектирования оборудования мест отдыха. В учебном процессе на курсах переподготовки военнослужащих в МИПК «Перспектива» с ее помощью разрабатывались варианты велосипеда, дельтаплана, устройства для нарезки овощей и других объектов, отвечающих интересам слушателей.

Так, при поиске вариантов технического решения с использованием ЭКОН-1.0 были получены многочисленные варианты, некоторые из которых представлены на рис. 4.8:

а: 1 — подрезной нож; 2 — плоский виброгрохот; 3 — лоток для очищенного щебня; 4 — пневмоколесный трактор; 5 — лоток для загрязнителей;

б: 1 — шнек; 2 — многоковшовый рабочий орган; 3 — лоток для загрязнителей; 4 — пневмоколесное ходовое оборудование; 5 — плоский виброгрохот; 6 — лоток для очищенного щебня;

в: 1 — ковш; 2 — плоский виброгрохот; 3 — лоток для очищенного щебня; 4 — лоток для загрязнителей; 5 — гусеничный трактор;

г: 1 — ковш; 2 — плоский виброгрохот; 3 — лоток для очищенного щебня; 4 — лоток для загрязнителей; 5 — пневмоколесный экскаватор;

д: 1 — фреза; 2 — плоский виброгрохот; 3 — лоток для очищенного щебня; 4 — пневмоколесный трактор; 5 — лоток для загрязнителей;

е: 1 — пневмоколесный трактор; 2 — ковш; 3 — ротор; 4 — плоский виброгрохот; 5 — лоток для загрязнителей; 6 — лоток для очищенного щебня;

ж: 1 — гусеничный трактор; 2 — ковш; 3 — ротор; 4 — барабанный виброгрохот; 5 — лоток для загрязнителей; 6 — лоток для очищенного щебня;

з: 1 — ковш; 2 — многоковшовый рабочий орган; 3 — центробежный грохот; 4 — ленточный транспортер; 5 — гусеничный трактор;

и: 1 — выгребное баровое устройство; 2 — ротор; 3 — плоский виброгрохот; 4 — лоток для очищенного щебня; 5 — ленточный транспортер для загрязнителей; 6 — платформа;

к: 1 — выгребное баровое устройство; 2 — плоский виброгрохот; 3 — лоток для очищенного щебня; 4 — ленточный транспортер; 5 — платформа;

л: 1 — подрезной нож; 2 — продувка; 3 — пневмотранспортирование загрязнителей; 4 — платформа; 5 — магнитные подъемники; 6 — устройство для брикетирования;

м: 1 — ковш; 2 — многоковшовый цепной рабочий орган; 3 — плоский виброгрохот; 4 — лоток для очищенного щебня; 5 — лоток для загрязнителей; 6 — гусеничное ходовое устройство; 7 — гидравлические подъемники;

н: 1 — ковш; 2 — многоковшовый цепной рабочий орган; 3 — плоский грохот; 4 — лоток для очищенного щебня; 5 — лоток для загрязнителей; 6 — пневмоколесное ходовое оборудование.

4.3. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ

Переходя к этапу исследовательского проектирования, названному принятием решения, конструктор располагает некоторыми вариантами технического решения. Прежде всего, ему нужно решить — что предпринять? Или продолжить поиск вариантов, или провести углубленный анализ всех имеющихся вариантов, или принять решение на основе имеющейся информации. В каждом случае нужно вначале дать оценку вариантам, затем эти оценки сравнить и только после этого выбрать вариант с наибольшей оценкой.

Руководствуясь основным принципом проектирования, эту процедуру следует отнести к отображению множества вариантов технического решения на множество оценок и выбору оптимального из вариантов:

$$(F : X_0 \rightarrow V) \rightarrow \text{opt.}$$

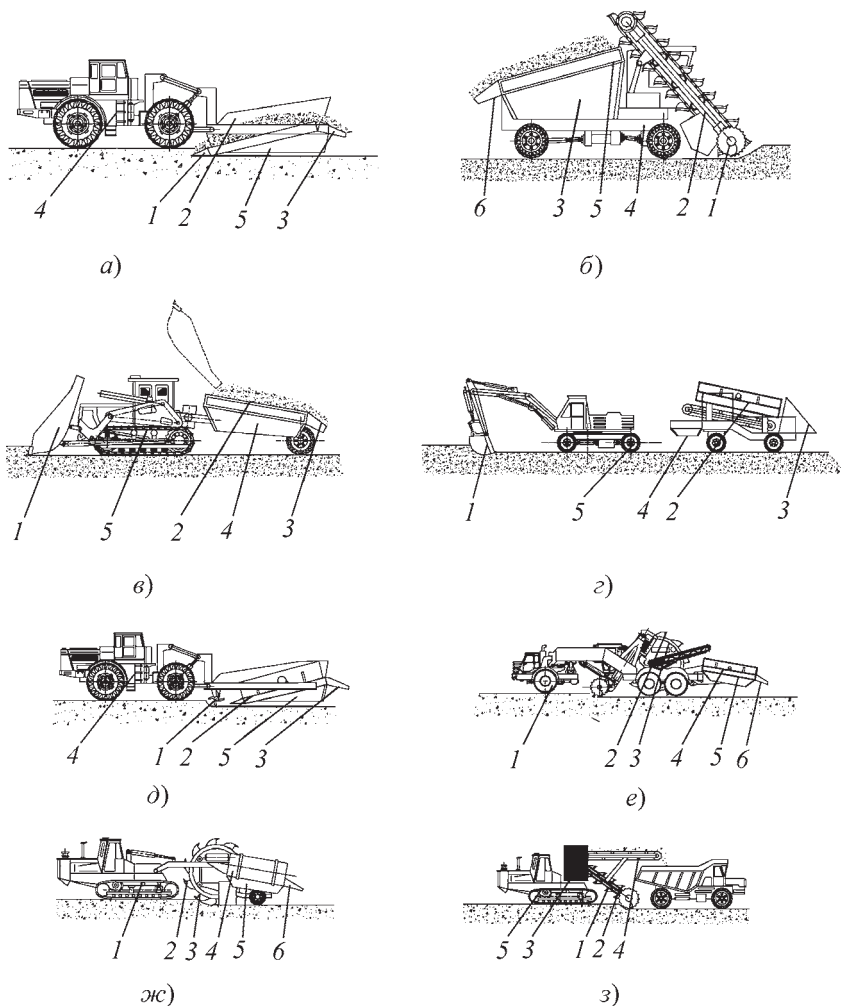


Рис. 4.8. Варианты технических решений с использованием ЭКОН-1.0

Выполнение процедуры принятия решения на данном этапе происходит в условиях, когда варианты ОП представлены лишь принципиальными (структурными) схемами, и дать количественную оценку

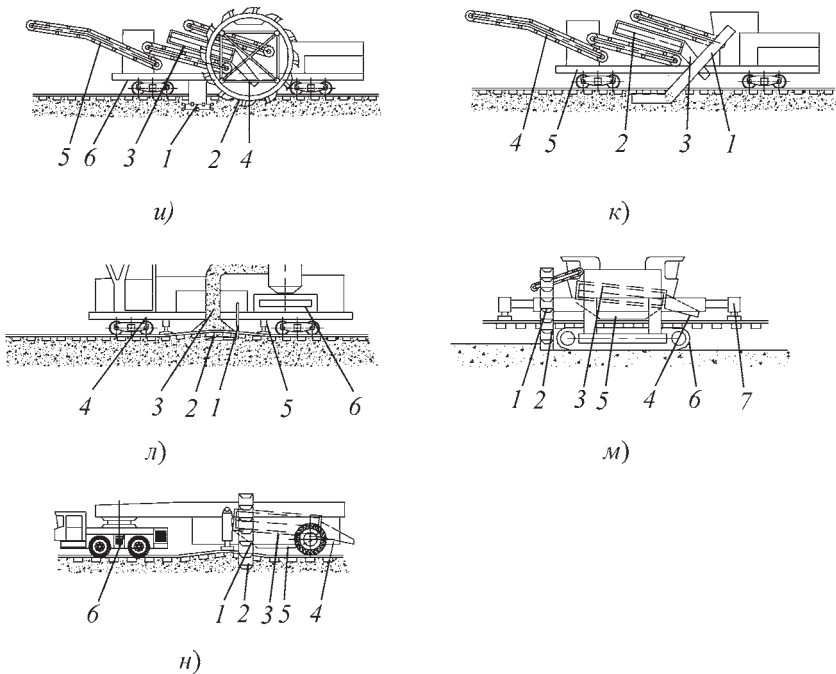


Рис. 4.8. Продолжение

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 к необходимости последующей его разработки, а это связано с трудовыми и временными расходами.

Признаки, используемые для сравнения, неравнозначны: одни более важны, другие менее. Некоторые из них противоречивы.

Охарактеризуем теперь общую постановку решаемой задачи:

1. Имеется множество вариантов технического решения

$$X_0 = (x_i); i = \overline{1, n}.$$

2. Оценку вариантов производят по совокупности критериев

$$V = (v_i); i = \overline{1, m}.$$

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 критериям 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 [41]: равномерности, справедливой уступки, выделения главного критерия, последовательной уступки.

Принцип равномерности может требовать:

1) равенства всех критериев

$$\begin{aligned} \text{opt } V &= \text{opt } V = \{\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = \dots = \bar{v}_k\} \in \Omega_V^k, \\ V &= \Omega_V V = \Omega_V^k, \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{opt } V &= \max \min v_i, \\ V &\in \Omega_V^k \end{aligned}$$

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.

$$\text{opt } V = \max \sum_{i=1}^k v_i.$$

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:

$$\Delta_{\text{отн}} = \sum (v_i - \bar{v}_i) / v_i,$$

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:

$$\text{opt } V = \max \prod_{i=1}^k \bar{v}_i.$$

Принцип выделения главного критерия сводит многокритериальную задачу к однокритериальной. Оптимизация происходит по главному критерию v_i^Γ на все остальные накладываются ограничения

$$\begin{aligned} \text{opt } V &= \max v_i^\Gamma \\ v_i &\geq v_i^3, \quad v_i^\Gamma \in \Omega_V^3, \end{aligned}$$

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 Δ_{v_1} . В пределах $\bar{v}_1$ и $\bar{v}_1 - \Delta_{v_1}$ ($\bar{v}_1$ — 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

$$V^H = \{v_i^H\} = \left\{ \frac{v_i}{v_i^H} \right\}; \quad i = \overline{1, k},$$

где V^H — нормализованный вектор критериев; v_i^H — компоненты идеального вектора.

«Идеальный» вектор критериев может составляться по заданным или желаемым значениям его компонент

$$V^H = V^3 = \{v_i^3\}; \quad i = \overline{1, k},$$

где v_i^3 — заданное значение компонент.

Одной из основных проблем многокритериальной задачи является проблема приоритета локальных критериев. На первом этапе критерии можно разместить в ряд по степени их важности. Здесь используется шкала порядка. На основании ряда строится вектор приоритета $(c_1, c_2, \dots, c_m)$, компоненты которого означают степень превосходства двух соседних критериев. Построение вектора приоритета использует шкалу интервалов. Удобно начинать с последней компоненты c_m , приравняв ее к 1. Все остальные компоненты оказываются равными или большими единицы. По ряду и вектору приоритета строится весовой вектор. Компоненты его удовлетворяют следующему условию:

$$\begin{cases} 0 \leq \lambda_j \leq 1; \quad j = \overline{1, m}; \\ \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1. \end{cases} \quad (4.1)$$

Условие (4.1) будет выдержано [41], если компоненты весового вектора находить по формуле

$$\lambda_j = \frac{\prod_{i=j}^m c_i}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=j}^m c_i}. \quad (4.2)$$

Компоненты весового вектора могут быть найдены и с применением нормирующей функции [41]:

$$\lambda_j = \frac{2^{\frac{j}{j-1}}}{\sum_{j=1}^m 2^{\frac{j}{j-1}}}. \quad (4.3)$$

Выбор оптимального конструктивного решения в условиях многокритериальной задачи удобнее всего производить с использованием так называемой матрицы решений [44] на основе компромисса, построенного по принципу справедливой уступки. Матрица решений представлена в табл. 4.3.

4.2. Матрица решений

Вариант	Критерий и его вес					$\sum_i^k v_i^o \lambda_i$	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)

В верхней строке табл. 4.3 размещаются критерии с указанием веса каждого из них. В левом столбце — номера вариантов. В ячейках таблицы проставляются оценки варианта по соответствующему критерию и в скобках — произведение оценки на вес критерия. Для оценки удобно использовать десятибалльную шкалу. Оптимальным вариантом по выбранным для сравнения критериям следует считать тот, у которого окажется наибольшей суммарная оценка $\sum_i^k v_i^o \lambda_i$.

Оценку вариантов можно выполнять попарным сравнением, пользуясь методом для ранжирования целей проектирования по важности. Для сравнения вариантов оказывается удобной и Генеральная определительная таблица (ГОТ). Критерии рассматриваются как характеристики, позиции соответствуют оценкам технического решения по каждому критерию.

При принятии решения по ГОТ оптимальным вариантом следует считать тот, у которого окажется наибольшим коэффициент инженерно-технической значимости.

Зачастую получается так, что оптимальными оказываются несколько вариантов. Это имеет место или в случае действительной равнозначности вариантов, или в результате погрешностей в определении параметров. Нельзя отбрасывать и варианты близкие 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.

Пример. Для сравнения вариантов ЩОМ используем в качестве критериев ранее установленные признаки ОП. Их относительные веса по важности (λ_j), где индекс j означает порядковый номер в ранжированной последовательности. Установим на основе нормирующей функции:

$$\lambda_j = \frac{2^{\frac{j}{j-1}}}{\sum_{j=1}^{13} 2^{\frac{j}{j-1}}}.$$

Относительные веса критериев представлены в табл. 4.4.

4.4. Относительные веса критериев

Вариант	Критерии	Вес λ_j
1	Вероятность безотказной работы	0,25
2	Средний ресурс	0,25
3	Глубина вырезки щебня	0,19
4	Качество очистки щебеночного балласта	0,12
5	Уровень вибрации	0,08
6	Производительность	0,05
7	Уровень шума	0,03
8	Удельная энергоемкость	0,01

Окончание табл. 4.4

Вариант	Критерии	Вес λ_i
9	Удельная металлоемкость	0,007
10	Себестоимость	0,005
11	Срок окупаемости	0,002
12	Габаритные размеры	0,001
13	Конструктивная масса	0,0007

Матрица решений включает номера рассматриваемых вариантов, критерии для сравнения (k_j) с их весами по важности (λ_j) и оценки вариантов (Q_{ij}), где индекс i означает номер варианта, j — номер критерия. Для оценки вариантов следует воспользоваться десятибалльной системой. Вначале по каждому отдельному критерию находится лучший вариант, ему присваивается наивысшая оценка. Все остальные варианты получают оценки путем сравнения с лучшим.

Матрица решений представлена в табл. 4.5. В верхней части ее ячеек проставлены оценки вариантов в баллах по критерию k_j , а в нижней — произведение оценки на вес критерия ($Q_{ij}\lambda_j$).

Оптимальным вариантом (занимающим первое место) считается тот, у которого величина $\sum Q_{ij}\lambda_j$ имеет наибольшее значение. В табл. 4.5 таким оказался второй вариант.

4.4. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Для автоматизированного выполнения процедуры принятия решения в связи с выбором оптимального варианта технического решения в программно-методическом комплексе использовано попарное сравнение по критериям, составленным из признаков объекта, отвечающим наиболее важным целям.

На рис. 4.9 представлена форма программного модуля П1.5 для выполнения процедуры принятия решения указанным методом.

После загрузки модуля пользователь должен ввести критерии для сравнения вариантов с указанием их веса в долях единицы с учетом нормирующего условия — веса критериев в сумме должны равняться единице. Далее модуль запросит общее количество вариантов и их обозначения.

Сравнивая варианты технического решения друг с другом, пользователь должен отдать предпочтение одному из них пользуясь шкалой, представленной на рис. 4.10. В ней последовательно по каждому крите-

4.5. Матрица решений

№	k_1 λ_1	k_2 λ_2	k_3 λ_3	k_4 λ_4	k_5 λ_5	k_6 λ_6	k_7 λ_7	k_8 λ_8	k_9 λ_9	k_{10} λ_{10}	k_{11} λ_{11}	k_{12} λ_{12}	k_{13} λ_{13}	$\sum_{j=1}^{13} Q_j \lambda_j$	Место
1	10 2,5	8 2,0	3 0,57	8 0,96	6 0,48	8 0,4	6 0,18	9 0,09	10 0,07	10 0,05	10 0,02	10 0,01	10 0,007	7,337	4
2	8 2,0	8 2,0	10 1,9	8 0,96	8 0,64	8 0,4	6 0,18	8 0,08	7 0,05	8 0,04	8 0,02	8 0,01	7 0,005	8,285	1
3	9 2,25	10 2,5	3 0,57	5 0,6	10 0,8	5 0,25	10 0,3	10 0,1	8 0,06	7 0,03	8 0,02	8 0,01	8 0,006	7,496	3
4	5 1,25	7 1,75	9 1,71	10 1,2	9 0,72	10 0,5	9 0,27	6 0,06	7 0,05	6 0,03	8 0,02	9 0,01	9 0,006	7,576	2
5	8 2,0	8 2,0	3 0,57	8 0,96	8 0,64	8 0,4	6 0,18	8 0,08	7 0,05	8 0,04	8 0,02	8 0,01	7 0,007	6,955	5

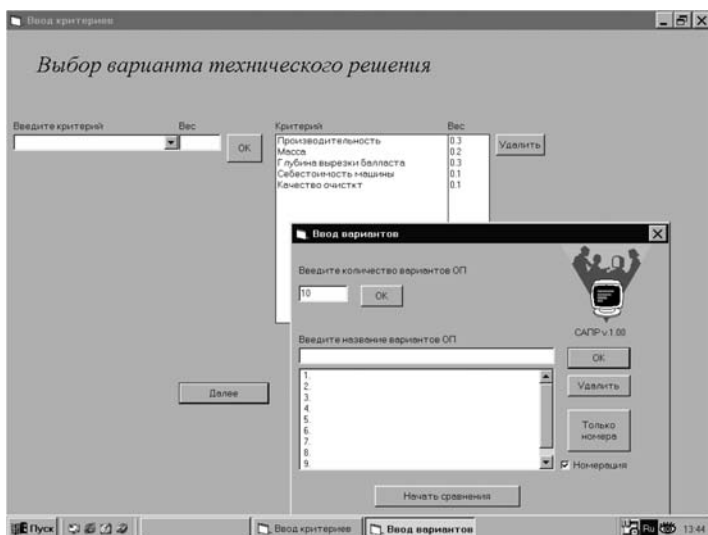


Рис. 4.9. Форма программного модуля П1.5 принятия решения

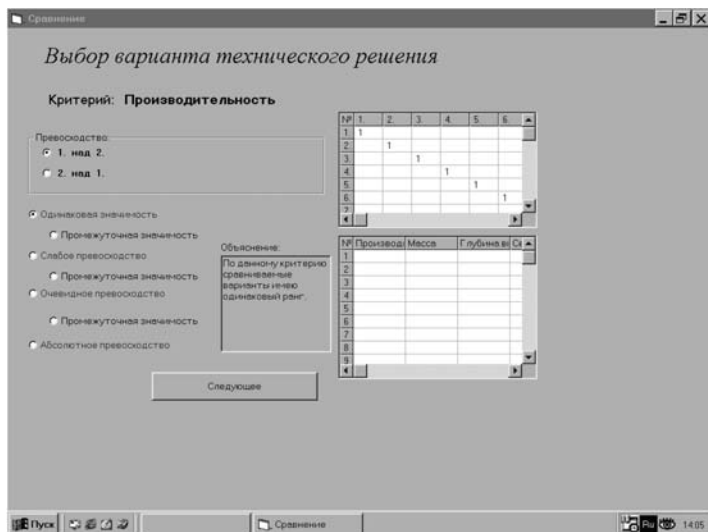


Рис. 4.10. Форма попарного сравнения вариантов

рию выводятся пары сравниваемых вариантов по их обозначениям. Пользователю представляется возможность отдать предпочтение одному из вариантов и выбрать из приведенного в форме списка степень превосходства одного варианта над другим.

В результате выполнения процедуры принятия решения будет произведено ранжирование вариантов по степени их соответствия целям проектирования.

Использование попарного сравнения для выбора наилучшего варианта ЩОМ показало преимущество варианта номер 2 (см. рис. 4.1).

4.5. АНАЛИЗ ПРИНЯТОГО РЕШЕНИЯ

Процедура анализа принятого решения на этапе разработки технического предложения проводится в целях получения необходимой информации для дальнейшего распознавания объекта. К моменту выполнения процедуры составлено структурное описание в виде принципиальной или кинематической схемы. В ходе анализа проверяются: работоспособность объекта, особенности его взаимодействия с факторами окружения, взаимосвязи составляющих подсистем и элементов.

В настоящее время существует условно три вида анализа: эвристический, аналитический (включая графоаналитический) и экспериментальный.

Первый вид анализа — эвристический, «добывает» ту или иную информацию на основе преобразования 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 среди прочих включают 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 металлоемкость, себестоимость, надежность и т.д.

Экспериментальные методы связаны с испытанием моделей или натурного образца объекта. Модели могут быть как физическими, так и математическими. Особое место занимает виртуальное моделирование.

Физическое моделирование использует модели, построенные на тех же физических принципах, что и натура. При любом уровне развития аналитических методов анализа физическое моделирование оста-

нется необходимым при использовании в машинах новых принципов взаимодействия со средой.

Модели могут создаваться как для объекта в целом, так и для его составных частей. Моделирование опирается на теорию подобия. Основы этой теории были заложены в трудах Ньютона, Бертрана, Коши, Фурье и других ученых. Теория подобия в свою очередь опирается на теорию размерностей. Основным понятием в теории размерностей является понятие *основных* единиц измерения. Так для системы «СИ» ими являются: масса (кг), длина (м), время (с), температура (К), сила света (кд), сила тока (А), количество вещества (моль). Основные единицы измерений независимы друг от друга и через них можно выразить все остальные (производные) единицы.

Свойствами основных единиц измерения могут обладать и другие единицы, называемые в этом случае *первичными*. В теории размерностей доказывается, что необходимым и достаточным условием отнесения единиц измерения к первичным является не равенство нулю определителя, составленного из показателей степеней в выражениях этих единиц через основные. Так, например, единицы измерений массы m , угловой скорости ω и силы F являются первичными. Действительно

$$[m] = M^1 L^0 T^0;$$

$$[\omega] = M^0 L^0 T^{-1};$$

$$[F] = M^1 L^1 T^{-2},$$

где M — размерность массы; L — размерность длины; T — размерность времени. Определитель из показателей степеней

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \end{vmatrix} = 1$$

отличен от нуля и, следовательно, набор единиц измерения, составленный из массы, угловой скорости и силы является первичным.

Две механические системы считаются подобными, если в сходственные моменты времени и в сходственных точках пространства их обобщенные координаты пропорциональны.

Фундаментальным понятием теории подобия является понятие *критерий подобия*. Критерий подобия — безразмерное отношение размерных величин. Критерии подобия обычно обозначаются символом π . Так, например, отношение $\frac{vt}{l}$ может рассматриваться как критерий, потому что оно безразмерно.

Приведем без доказательства основные теоремы подобия.

Первая теорема. Необходимым условием подобия двух систем является равенство критериев подобия, составленных из обобщенных координат и параметров этих систем.

Вторая теорема (π—теорема). Зависимости между обобщенными координатами и параметрами системы могут быть преобразованы в зависимость между критериями подобия.

Третья теорема. Достаточным условием подобия двух систем является равенство критериев подобия, составленное из обобщенных координат, основных параметров и начальных условий.

Для моделирования должны быть найдены независимые критерии подобия, т.е. такие критерии, каждый из которых нельзя выразить через другие путем элементарных преобразований. В теории подобия доказывается, что из n размерных единиц (параметров) может быть построено $n - R$ независимых критериев подобия, где R — число основных единиц измерений для рассматриваемой системы. У механической системы $R = 3$ (масса, время, длина).

Из существующих методов определения критериев подобия рассмотрим на конкретном примере два из них: метод на основе анализа размерностей и метод на основе дифференциальных уравнений.

В качестве примера найдем критерии подобия для моделирования системы подвески автомобильного колеса, представленной на рис. 4.11.

На схеме обозначено: m — масса колеса, c — жесткость рессоры, k — коэффициент демпфирования, F — реакция со стороны дороги, F_0 — амплитудное значение реакции, ω — частота возмущений со стороны дороги, t — время.

В рассматриваемом примере нас интересует смещение колеса вдоль оси X , поэтому в качестве обобщенной координаты принимаем координату x . В общем случае она является функцией от параметров системы

$$x = f(m, c, k, F_0, \omega, t). \quad (4.4)$$

В выражении (4.4) есть величины, которые можно принять за первичные. Это m , ω , F_0 .

Перейдем от зависимости между обобщенной координатой и параметрами к зависимости между критериями подобия. Для этого разделим все величины, входящие в функцию на произведение первичных единиц с некоторыми показателями степени.

Для каждого отношения необходимо подобрать значения показателей степени, при которых эти отношения станут безразмерными. Для

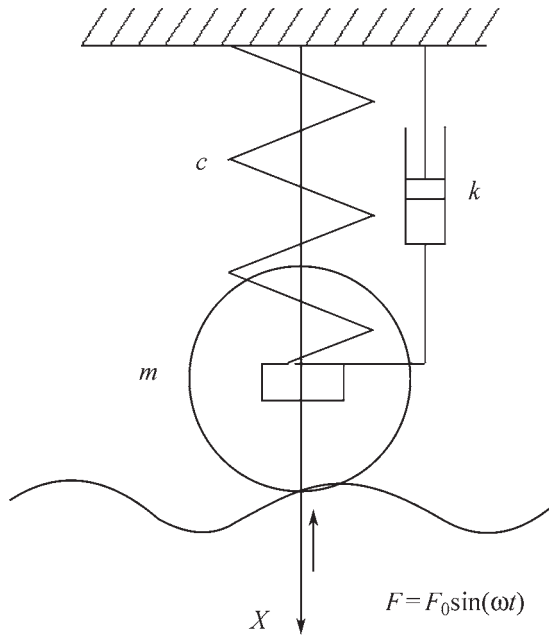


Рис. 4.11. Схема подвески автомобильного колеса

этого размерность отношений выразим через основные единицы. Например, для первого отношения

$$\left[\frac{x}{m^{\alpha_x} \omega^{\beta_x} F_0^{\gamma_x}} \right] = \frac{L}{M^{\alpha_x} T^{-\beta_x} M^{\gamma_x} L^{\gamma_x} T^{-2\gamma_x}} =$$

$$= \frac{L}{M^{\alpha_x + \gamma_x} L^{\gamma_x} T^{-\beta_x - 2\gamma_x}} = M^{-\alpha_x - \gamma_x} L^{1 - \gamma_x} T^{\beta_x + 2\gamma_x}.$$

Отношение будет безразмерным, если

$$\begin{cases} -\alpha_x - \gamma_x = 0; \\ 1 - \gamma_x = 0; \\ \beta_x + 2\gamma_x = 0. \end{cases}$$

Решив систему уравнений, найдем: $\alpha_x = -1$; $\beta_x = -2$; $\gamma_x = 1$.

При найденных значениях показателей степеней первое отношение составит безразмерный комплекс. Обозначим его первым критерием подобия

$$\frac{m\omega^2 x}{F_0} = \pi_1.$$

Поступив подобным образом с другими отношениями, можно убедиться, что те из них, которые имеют в числителе первичные единицы измерений, не составят безразмерные комплексы, а приведут к отношению первичной единицы к самой себе. Эти отношения не образуют критерии подобия. Из остальных отношений будет получено:

$$\frac{c}{m\omega^2} = \pi_2; \quad \frac{k}{m\omega} = \pi_3; \quad \omega t = \pi_4.$$

Таким образом, из семи размерных величин получено четыре критерия подобия.

Рассмотрим второй метод определения критериев подобия — метод на основе дифференциального уравнения. Дифференциальное уравнение движения подвески колеса имеет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + cx = F_0 \sin(\omega t).$$

Все слагаемые в левой части и выражение в правой части уравнения имеют размерность силы, поэтому, разделив все члены уравнения на один из них, например первый, получим безразмерные комплексы. Знаки дифференциала при этом отбрасываются. Кроме того, в уравнении уже есть безразмерный комплекс. Это аргумент синуса. Его можно принять за первый критерий подобия, т.е. $\pi'_1 = \omega t$. Остальные три критерия подобия получают выражение:

$$\pi'_2 = \frac{kxt^2}{tmx} = \frac{kt}{m}; \quad \pi'_3 = \frac{cxt^2}{mx} = \frac{ct^2}{m}; \quad \pi'_4 = \frac{F_0 t^2}{mx}.$$

Используя два различных метода, получены два набора критериев подобия, но они не являются независимыми. Каждый из них может быть получен из другого путем элементарных преобразований, поэтому для дальнейшего рассмотрения может быть принят любой набор.

Для построения физической модели необходимы коэффициенты подобия. Чтобы их получить, приравняем критерии подобия для модели и натуры. Воспользуемся вторым набором критериев:

$$\omega_m t_m = \omega_n t_n; \quad \frac{k_m t_m}{m_m} = \frac{k_n t_n}{m_n}; \quad \frac{c_m t_m^2}{m_m} = \frac{c_n t_n^2}{m_n}; \quad \frac{F_{0m} t_m^2}{m_m x_m} = \frac{F_{0n} t_n^2}{m_n x_n},$$

или

$$1 = \frac{\omega_n t_n}{\omega_m t_m}; \quad 1 = \frac{k_n t_n m_m}{m_n k_m t_m}; \quad 1 = \frac{c_n t_n^2 m_m}{m_n c_m t_m^2}; \quad 1 = \frac{F_{0n} t_n^2 m_m x_m}{F_{0m} t_m^2 m_n x_n}.$$

В приведенных равенствах содержатся коэффициенты подобия. Например, отношение ω_n/ω_m составляет коэффициент подобия по частоте, обозначим его K_ω . Используя коэффициенты подобия и по другим величинам, получим

$$1 = K_\omega K_t; \quad 1 = \frac{K_k K_t}{K_m}; \quad 1 = \frac{K_c K_t^2}{K_m}; \quad 1 = \frac{K_F K_t}{K_m K_x}.$$

Величины коэффициентов подобия должны удовлетворять приведенным равенствам. Некоторыми коэффициентами можно задаться. Так, не моделируя время, принимаем $K_t = 1$. Из других коэффициентов можно задаться, например, коэффициентом, связанным с длиной (K_x) и массой (K_m). Остальные коэффициенты следует найти из приведенных выше равенств.

Коэффициенты подобия дают возможность определить параметры модели, а после ее изготовления и испытаний распространить установленные на ней параметры на натуру.

Математическое моделирование использует аналогию дифференциальных уравнений, описывающих объекты с различной физической природой. Так, электрический контур, представленный на рис. 4.12, описывается дифференциальным уравнением

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{c'} q = u_0 \sin(\omega' t),$$

где L — индуктивность; c' — емкость конденсатора; q — сила тока; u_0 — амплитудное значение напряжения; ω' — частота изменения напряжения; R — электрическое сопротивление; t — время.

Если сравнить дифференциальное уравнение для электрического контура с дифференциальным уравнением для подвески автомобильного колеса, можно увидеть их аналогию с точностью до обозначений.

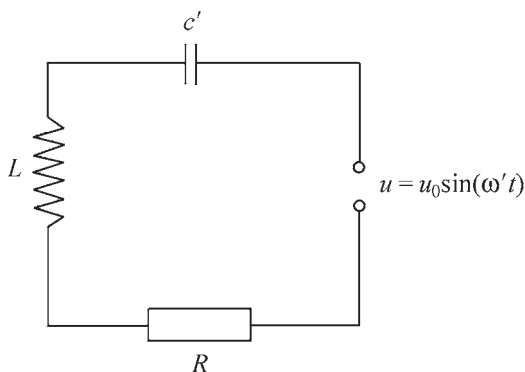


Рис. 4.12. Электрический контур

Аналогом массы в подвеске колеса служит индуктивность в колебательном контуре, сила тока — аналог перемещения, электрическое сопротивление — аналог вязкого сопротивления, емкость конденсатора — аналог обратной величине жесткости пружины, амплитудное значение напряжения — аналог амплитудного значения реакции дороги, частота изменения напряжения — аналог частоты изменения реакции дороги.

Если составить и приравнять соответствующие критерии подобия для двух рассматриваемых систем, а затем определить коэффициенты подобия, то, проведя испытания электрического контура, можно установить параметры механической системы подвески колеса.

В общем случае аналитические методы анализа используют математические модели объекта проектирования. Различают три уровня моделей (МОП) [34]:

1. Микроуровень. Модели представляются дифференциальными уравнениями в частных производных с краевыми условиями. Переменные, характеризующие объект, распределены в пространстве. Такие модели применимы, в частности, к расчету прочности деталей машин и поэтому используются на поздних стадиях проектирования.

2. Макроуровень. Дискретные модели, элементами которых выступают объекты, рассматриваемые на микроуровне как системы. Эти модели представляются алгебраическими или обыкновенными дифференциальными уравнениями. На макроуровне возможен функционально-логический подход, использующий, в частности, аппарат математической логики и дискретизацию процесса функционирования объекта, рассмотрением конкретного множества его состояний.

3. Метауровень. Объект проектирования рассматривается как сложная система, взаимодействующая с факторами его окружения. Для представления метамодели используется теория автоматического управления, теория массового обслуживания, планирование эксперимента, математическая логика, теория множеств.

Применение того или иного уровня МОП зависит от сложности объекта. Если анализируется отдельный механизм или совокупность механизмов с различной физической природой (например механический и гидравлический), то уместно использовать макроуровень. Для анализа работы машины или комплекта машин с учетом их жизнеобеспечения (условий эксплуатации, технического обслуживания, ремонта) приходится обращаться к метаяуровню.

В основе создания МОП объектов, включающих механизмы с различной физической природой, лежит использование аналогий в описании этих механизмов с помощью дифференциальных уравнений.

Математическую модель на макроуровне составляют компонентные и топологические уравнения. Компонентные уравнения описывают свойства элементов объекта проектирования, топологические — взаимосвязь элементов.

Компонентные уравнения в общем случае имеют вид

$$F_k(dV/dt, V, t) = 0;$$

топологические уравнения:

$$F_t(V) = 0,$$

где $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ — вектор фазовых переменных; t — время.

Фазовые переменные имеют два типа: потенциала (U) и потока (I). Фазовые переменные в системах с различной физической природой представлены в табл. 4.6.

Так, например, компонентные уравнения для элементов электрической системы имеют хорошо известный вид

$$U = RI; I = c(dU/dt); U = L(dI/dt),$$

где U — напряжение; I — ток; R — сопротивление; c — емкость; L — индуктивность.

Для механической системы

$$F = m(du/dt); P = E_{ю}(\Delta l/l),$$

где m — масса элемента; F — сила; u — скорость; $E_{ю}$ — модуль упругости (модуль Юнга); Δl — изменение размера под воздействием напряжения; l — размер элемента до возникновения в нем напряжений; P — механическое напряжение.

4.6. Фазовые переменные в системах с различной физической природой

Система	Фазовые переменные	
	Типа I	Типа U
Электрическая	Ток	Напряжение
Механическая поступательная	Сила	Скорость
Упругая	Вращательный момент	Деформация
Вращательная		Угловая скорость
Гидравлическая	Поток (Расход)	Давление
Пневматическая		
Тепловая	Тепловой поток	Температура

Сравнивая компонентные уравнения для электрической и механической систем, можно видеть аналогию электрического тока и механической силы, и при этом электрическое напряжение оказывается аналогом механической скорости, а электрическая емкость — механической массы.

Топологические уравнения для механической системы отражают принцип Даламбера, согласно которому сумма всех сил, действующих на тело, включая силу инерции, равно нулю

$$\sum_k F_k = 0,$$

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 электрической системы топологические уравнения отражают второй закон Кирхгофа, согласно которому для любого узла замкнутого электрического контура

$$\sum_k I_k = 0,$$

а для всего замкнутого контура

$$\sum_i U_i = 0.$$

Для механических упругих систем в качестве элементов выбирается гибкость участков сплошной среды, а фазовых переменных — силу и скорость или силу и перемещение.

Компонентные уравнения отражают относительную деформацию, например, при продольной деформации стержня

$$\Delta l/l = (1/E_{\text{ю}})(P_x - \nu P_y - \nu P_z),$$

где l — продольный размер элемента (вдоль оси x); Δl — изменение продольного размера; ν — коэффициент Пуассона; P_x, P_y, P_z — напряжения вдоль координатных осей.

Топологические уравнения отражают условие равновесия и условие совместимости деформаций, означающие равенство нулю суммарной деформации элементов вдоль любого замкнутого контура.

Для механических вращательных систем элементами являются: моменты инерции относительно осей вращения (I), вращательная гибкость ($L_{\text{вр}}$) и вращательное сопротивление ($R_{\text{вр}}$). Фазовые переменные: вращательный момент (M) и угловая скорость (Ω). Компонентные уравнения:

$$M = I(d\Omega/dt); \quad L_{\text{вр}}(dM/dt) = \Omega_1 - \Omega_2; \quad MR_{\text{вр}} = \Omega_1 - \Omega_2,$$

где Ω_1 и Ω_2 — угловые скорости концов участка вращательной передачи.

Топологические уравнения по аналогии с поступательным движением

$$\sum_k M_k = 0; \quad \sum_k \Omega_k = 0.$$

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 $\sum_k g_k = 0$ и $\sum_i p_i = 0$ означают, что сумма потоков в любом узле и сумма давлений вдоль любого контура равна нулю.

Компонентные уравнения прямого участка трубопровода при ламинарном течении жидкости выражаются уравнением Навье — Стокса:

$$dU/dt = -\rho^{-1}(\partial p/\partial t) - 2(\alpha/\rho)U,$$

где U — скорость потока; ρ — плотность; p — давление; x — координата; α — коэффициент линеаризованного вязкого трения в трубопроводе.

Заменив $\partial p / \partial x$ на p/l , где p — разность давления на рассматриваемом участке; l — длина участка. Учитывая, что $g = \rho S U$ (S — площадь сечения трубопровода) и $\rho = \text{const}$, получим

$$dg/dt = (S/l)p - 2(\alpha/\rho)g$$

или

$$p = \frac{(dg/dt) + 2(\alpha/\rho)g}{S/l}.$$

Если обозначить $L_r = l/S$; $R_r = 2\alpha l/(\rho S)$, то $p = L_r(dg/dt) + R_r g$. В этом случае можно увидеть, что участок трубопровода есть аналог последовательного соединения электрических элементов индуктивности сопротивления.

Если $\rho \neq \text{const}$, то $L_r(dg/dt) + R_r g - IU(dp/dt)$.

Для круглой трубы с радиусом r

$$R_r = 8\nu l/(\pi r^4),$$

где ν — кинематическая вязкость.

МОП можно представить в графической форме, называемой эквивалентной схемой. Эквивалентная схема состоит из узлов и ветвей. Каждая ветвь относится к одному из пяти возможных типов (рис. 4.13).

Каждому узлу соответствует значение фазовой переменной типа потенциала, а каждой ветви — значение фазовых переменных I и U .

Применительно к механической системе эквивалентные схемы строятся для каждой ее степени свободы. Тела с учитываемой массой представляются узлом. Один из узлов, относящийся к инерциальной системе отсчета, называется базовым. Масса тела представляется ветвью, соединяющей соответствующий узел с базовым узлом. Гибкость, сопротивление изображаются ветвями между связанными таким образом телами. Внешние воздействия представляются источниками силы или скорости.

Для примера составим эквивалентную схему для подвески колеса, используемой уже при рассмотрении физического моделирования. В качестве инерциальной системы отсчета примем дорогу. В этом случае на схеме должно быть три узла, один из них базовый (дорога), второй — колесо, а третий — рама. Рассматривая только подвеску, не будем учитывать упругость самого колеса. В этом случае эквивалентная схема имеет вид, представленный на рис. 4.14.

Компонентные уравнения для ветвей эквивалентной схемы в качестве фазовых переменных включают силу F и скорость v или силу и деформацию x .

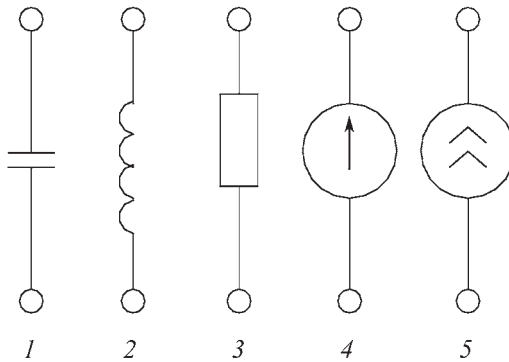


Рис. 4.13. Типы ветвей на эквивалентных схемах:

1 — емкость (масса); 2 — индуктивность (гибкость); 3 — сопротивление (трение); 4 — источник напряжения (источник скорости, деформации давления); 5 — источник тока (источник силы). В скобках приведены названия типов ветвей для механической системы

Для ветви типа индуктивности

$$F = cx,$$

где c — жесткость пружины.

Для ветви типа сопротивления

$$F = k(dx/dt),$$

где k — коэффициент вязкого сопротивления.

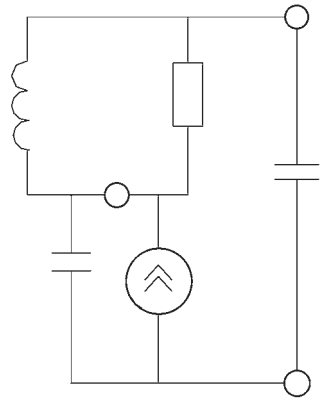


Рис. 4.14. Эквивалентная схема подвески колеса

Для ветви типа емкости

$$F = m(dv/dt),$$

где m — масса.

Для ветви типа источника тока

$$F = F_a \sin(\omega t),$$

где F_a — амплитудное значение силы; ω — частота возмущений со стороны дороги.

Топологическое уравнение для узла, представляющее колесо, на основании принципа Деламбера ($\sum_i F_i = 0$):

$$m(dv/dt) + k(dx/dt) + cx = F_a \sin(\omega t).$$

Это уравнение уже использовалось при математическом моделировании подвески колеса.

4.6. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Имитационное моделирование как один из методов анализа систем применяется в исследовательском проектировании 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.

Основы постановки задачи и методов ее решения [6]

Для того чтобы задать сложную систему, необходимо представить описание всех ее элементов и взаимодействие 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 и характеризуют 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

$$z_{t^*+0} = z'(t^*, z^*). \quad (4.5)$$

Под $t^* + 0$ понимается момент времени, весьма близкий t^* .

В момент t^* система выдает выходной сигнал

$$y_{t^*} = G^*(t^*, z^*), \quad (4.6)$$

где G^* — заданная функция (может быть случайной).

С момента времени $t^* + 0$ система вновь начинает совершать движение к границе. В некоторый момент времени $\bar{t}$, когда система находится в состоянии $\bar{z}$, поступает входной сигнал $\bar{x}$. 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:

$$z_{\bar{t}+0} = z''(\bar{t}, \bar{z}, \bar{x}). \quad (4.7)$$

Момент времени $\bar{t}$ также относится к опорным. В этот же момент выдается выходной сигнал

$$y_{\bar{t}} = \bar{G}(\bar{t}, \bar{z}, \bar{x}). \quad (4.8)$$

Из точки $\bar{z}$ 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_t 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 обшей 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 $\bar{t}$ поступления и значения $\bar{x}$ сигналов).

Динамические системы с дискретным вмешательством случая распространяются на широкий класс задач. Даже тогда, когда входной сигнал распределен по времени, его можно считать поступающим через определенный интервал, а изменение координат сигнала $x(t)$ представить ступенчатой функцией.

При анализе объекта проектирования 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 не поступления 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_j) имеет одинаковую плотность распределения $f(z_j)$, 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

$$f(z) = \lambda e^{-\lambda z}.$$

В качестве примера используем имитационное моделирование для описания работы землеройной машины. В данном случае в качестве системы будем рассматривать: «машина — грунт», а случайными воздействиями на нее встречу рабочего органа с твердыми включениями. Под твердыми включениями понимаем попадающиеся в массиве грунта валуны, осколочные твердые породы или металлические предметы. Область состояний системы можно представить множеством из трех элементов: машина работает в балласте 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. Время работы машины до встречи с препятствиями рассматриваем как случайную величину, распределенную по показательному закону. На рис. 4.15 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, принимаются как 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 $0t$, однородны, 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 со-

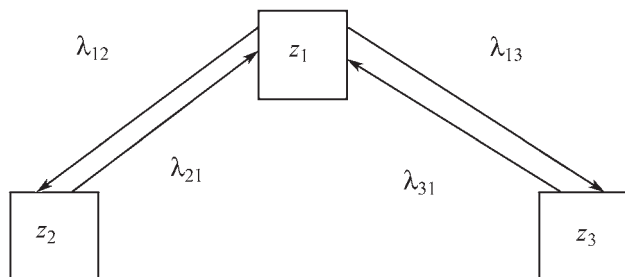


Рис. 4.15. Граф состояний «машина — грунт»

бытий, 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. Финальные вероятности состояния системы найдем на основании уравнений Колмогорова. Правила составления уравнений:

1. Число уравнений равно числу состояний.

2. В левой части каждого уравнения стоит производная по времени вероятности состояния.

3. Правая часть уравнения содержит столько членов, сколько стрелок связывают данное состояние с другими. Если стрелка направлена из рассматриваемого состояния, то соответствующий член уравнения имеет знак минус. Если стрелка направлена в состояние — плюс.

4. Каждый член в правой части уравнения равен произведению плотности потока событий на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка.

Для марковских процессов вероятность событий не меняется со временем, поэтому левые части уравнений равны нулю.

Уравнения Колмогорова для системы, представленной на рис. 4.15, имеют вид после переноса левой их части в правую:

$$\begin{cases} \lambda_{12} p_1 + \lambda_{13} p_1 - \lambda_{21} p_2 - \lambda_{31} p_3 = 0; \\ \lambda_{21} p_2 - \lambda_{12} p_1 = 0; \\ \lambda_{31} p_3 - \lambda_{13} p_1 = 0, \end{cases}$$

где λ_{ij} — плотность потоков событий, переводящих систему из одного состояния в другое; p_i — финальные вероятности состояний системы.

Заменяя нормировочным условием одно из уравнений, например третье, найдем систему для отыскания финальных вероятностей состояний:

$$\begin{cases} \lambda_{12} p_1 + \lambda_{13} p_1 - \lambda_{21} p_2 - \lambda_{31} p_3 = 0; \\ \lambda_{21} p_2 - \lambda_{12} p_1 = 0; \\ p_1 + p_2 + p_3 = 1. \end{cases}$$

Плотность потоков событий можно выразить как обратную величину среднего значения длины интервала до их наступления. Так, плотность потока событий, переводящих систему из первого состояния во второе λ_{12} , определяется средним временем непрерывной работы до встречи с преодолимой твердым включением t_{12} . Пусть это время составит 2,2 мин. Тогда $\lambda_{12} = 0,45$.

Среднее время непрерывной работы машины до встречи с непреодолимой 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 непреодолимой твердым включением t_{31} считаем равным 0,3 мин и отсюда $\lambda_{31} = 3,3$. Подставив значения λ_{12} , λ_{13} , λ_{21} , λ_{31} в систему (4.17) и 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 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 $0 \leq e_n \leq 0,23$ система приходит во второе состояние и при $0,23 \leq e_n \leq 1$ — в первое.

Эксперимент будет протекать следующим образом. В начальный момент времени ($t = 0$) определяется по датчику случайных чисел со-

стояние системы. Для первого состояния время получает приращение, равное шагу его изменения (принимая $\Delta t = 0,5$ мин), для второго и третьего состояний приращение времени равно средней продолжительности пребывания в соответствующем состоянии. На каждом шаге определяется выработка машины. Для первого состояния она равна $P_t \Delta t / 60$, для второго $P_t t_{21} / 60$, для третьего равна нулю (машина простаивает), где P_t — теоретическая часовая 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 $18 \text{ м}^3/\text{ч}$, а в состоянии z_2 — уменьшается вдвое. Алгоритм вычислительного эксперимента представлен на рис. 4.16, используемые идентификаторы приведены в табл. 4.7.

4.7. 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	$T1$
Выходные переменные	
Суммарная выработка за час	C

Результатом вычислительного эксперимента стало определение часовой выработки машины в условиях воздействия на нее случайных событий, связанных с встречей с твердыми включениями. В итоге часовая выработка (табл. 4.8) составила $16,092 \text{ м}$, что на $10,6 \%$ меньше выработки, определенной с учетом лишь теоретической производительности.

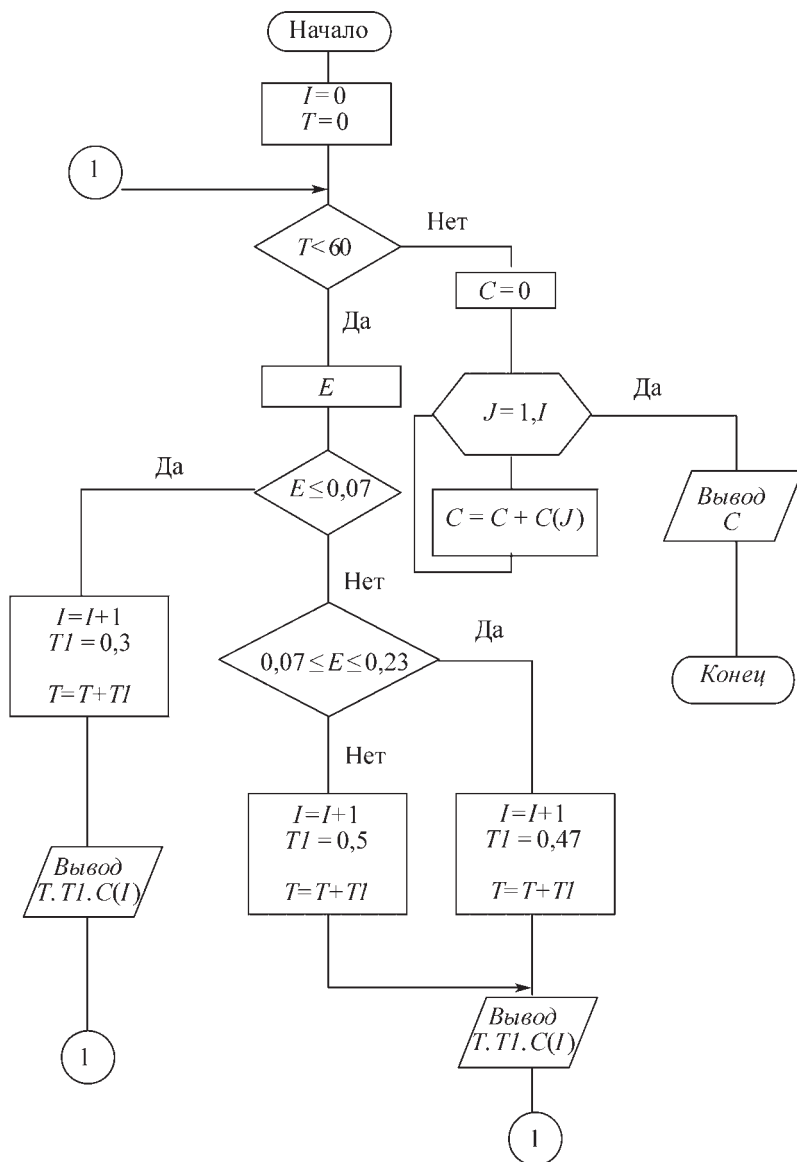


Рис. 4.16. Алгоритм вычислительного эксперимента

4.8. Результаты вычислительного эксперимента

T	E	TI	$C(I)$	T	E	TI	$C(I)$
0,00	0,0925	0,47	0,0705	10,86	0,1554	0,47	0,0705
0,47	0,7496	0,50	0,1500	11,33	0,7228	0,50	0,1500
0,97	0,7152	0,50	0,1500	11,83	0,1866	0,47	0,0705
1,47	0,5259	0,50	0,1500	12,30	0,9796	0,50	0,1500
1,97	0,1945	0,47	0,0005	12,80	0,3065	0,50	0,1500
2,44	0,1256	0,47	0,0705	13,30	0,3352	0,50	0,1500
2,91	0,1030	0,47	0,0705	13,80	0,5715	0,50	0,1500
3,38	0,0496	0,30	0,0000	14,30	0,4944	0,50	0,1500
3,68	0,9852	0,50	0,1500	14,80	0,3933	0,50	0,1500
4,18	0,8701	0,50	0,1500	15,30	0,7917	0,50	0,1500
4,68	0,1180	0,47	0,0705	15,80	0,3233	0,50	0,1500
5,15	0,1515	0,47	0,0705	16,30	0,2407	0,50	0,1500
5,62	0,6661	0,50	0,1500	16,80	0,2586	0,50	0,1500
6,12	0,1337	0,47	0,0705	17,30	0,8916	0,50	0,1500
6,59	0,5460	0,50	0,1500	17,80	0,9748	0,50	0,1500
7,09	0,3680	0,50	0,1500	18,30	0,7829	0,50	0,1500
7,59	0,8049	0,50	0,1500	18,80	0,6785	0,50	0,1500
8,09	0,1624	0,47	0,0705	19,30	0,3231	0,50	0,1500
8,56	0,0681	0,30	0,0000	19,80	0,2023	0,47	0,0705
8,86	0,4047	0,50	0,1500	20,27	0,0055	0,30	0,0000
9,36	0,7303	0,50	0,1500	20,57	0,1121	0,47	0,0705
9,86	0,4747	0,50	0,1500	21,04	0,9384	0,50	0,1500
10,36	0,2637	0,50	0,1500	21,54	0,9257	0,50	0,1500

Продолжение табл. 4.8

T	E	TI	$C(I)$	T	E	TI	$C(I)$
22,04	0,8156	0,50	0,1500	33,45	0,9381	0,50	0,1500
22,54	0,6854	0,50	0,1500	33,95	0,2470	0,50	0,1500
23,04	0,9859	0,50	0,1500	34,45	0,4515	0,50	0,1500
23,54	0,1005	0,47	0,0705	34,95	0,1951	0,47	0,1500
24,01	0,6131	0,50	0,1500	35,42	0,5273	0,50	0,1500
24,51	0,6591	0,50	0,1500	35,92	0,7424	0,50	0,1500
25,01	0,4564	0,50	0,1500	36,42	0,7315	0,50	0,1500
25,51	0,4150	0,50	0,1500	36,92	0,1476	0,47	0,1500
26,01	0,7047	0,50	0,1500	37,39	0,6930	0,50	0,1500
26,51	0,4616	0,50	0,1500	37,89	0,3671	0,50	0,1500
27,01	0,4929	0,50	0,1500	38,39	0,5846	0,50	0,1500
27,51	0,7875	0,50	0,1500	38,89	0,0256	0,30	0,1500
28,01	0,5751	0,50	0,1500	39,19	0,0886	0,47	0,0705
28,51	0,2818	0,50	0,1500	39,66	0,2136	0,47	0,0705
29,01	0,6983	0,50	0,1500	40,13	0,9332	0,50	0,1500
29,51	0,8312	0,50	0,1500	40,63	0,6233	0,50	0,1500
30,01	0,6745	0,50	0,1500	41,13	0,4457	0,50	0,1500
30,51	0,2398	0,50	0,1500	41,63	0,4735	0,50	0,1500
31,01	0,1180	0,47	0,0705	42,13	0,2220	0,47	0,0705
31,48	0,3688	0,50	0,1500	42,60	0,6341	0,50	0,1500
31,98	0,7488	0,50	0,1500	43,10	0,3362	0,50	0,1500
32,48	0,5178	0,50	0,1500	43,60	0,2525	0,50	0,1500
32,98	0,1898	0,47	0,1500	44,10	0,2325	0,50	0,1500

Окончание табл. 4.8

<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>
44,60	0,4500	0,50	0,1500	52,57	0,7702	0,50	0,1500
45,10	0,2443	0,50	0,1500	53,07	0,0735	0,47	0,0705
45,60	0,3284	0,50	0,1500	53,54	0,4374	0,50	0,1500
46,10	0,9532	0,50	0,1500	54,04	0,5795	0,50	0,1500
46,60	0,3942	0,50	0,1500	54,54	0,6312	0,50	0,1500
47,10	0,4209	0,50	0,1500	55,04	0,8368	0,50	0,1500
47,60	0,8652	0,50	0,1500	55,54	0,0959	0,47	0,0705
48,10	0,7243	0,50	0,1500	56,01	0,9572	0,50	0,1500
48,60	0,5670	0,50	0,1500	56,51	0,6167	0,50	0,1500
49,10	0,2024	0,47	0,0705	57,01	0,7191	0,50	0,1500
49,57	0,6113	0,50	0,1500	57,51	0,1753	0,47	0,0705
50,07	0,8936	0,50	0,1500	57,98	0,7830	0,50	0,1500
50,57	0,6758	0,50	0,1500	58,48	0,6311	0,50	0,1500
51,07	0,9020	0,50	0,1500	58,98	0,6686	0,50	0,1500
51,57	0,7736	0,50	0,1500	59,48	0,6750	0,50	0,1500
52,07	0,9161	0,50	0,1500	59,98	0,8548	0,50	0,1500

Примечание. Суммарная выработка машины за один час работы 16,092 м.

4.7. ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ

Функционально-стоимостной анализ (ФСА) является средством снижения себестоимости производства изделий [27]. Он может применяться при решении следующих задач:

- проектирование новых изделий и технологий;
- модернизация освоенных в производстве изделий;
- реконструкция предприятий;

- снижение затрат основного и вспомогательного производства;
- снижение расхода сырья, материалов, топлива и энергии;
- снижение трудоемкости и экономия людских ресурсов.

Основные задачи ФСА применительно к проектированию новых или модернизаций существующих изделий машиностроения:

- выявление и ранжирование по важности функций изделий;
- устранение лишних функций;
- определение и сравнение стоимости функций;
- выявление зон наибольшего сосредоточения затрат;
- поиск улучшенных конструкторских решений средств реализации функций.

Центральным звеном ФСА является анализ, классификация и определение стоимости функций объекта.

В любом изделии можно выявить главные, основные и вспомогательные функции. В результате анализа могут быть вскрыты и ненужные функции.

Главные функции выполняют основные элементы изделия. К ним относятся рабочие органы и другие элементы, непосредственно взаимодействующие с предметом обработки и объектами окружающей среды. Главные функции определяются назначением изделия, а окружающая среда для главных элементов, как правило, совпадает с объектами, на которые направлено действие изделия.

Основные функции выполняют элементы, обеспечивающие работу главных элементов. При исключении основной функции выполнение главной функции становится невозможной.

Вспомогательные функции относятся к элементам, делающих выполнение главной или основной функции более эффективной, а сам объект более привлекательным для потребителя. При исключении вспомогательной функции работоспособность объекта не нарушается, но снижаются некоторые показатели качества.

Ненужные функции — это такие, без которых объект останется работоспособным при сохранении установленных для него показателей качества. Ненужные функции вскрываются в результате анализа.

План проведения ФСА включает четыре этапа:

1. *Подготовительный этап* включает определение целей ФСА, подбор и утверждение состава исследовательской группы, обучение (при необходимости) специалистов группы основам ФСА, составление, согласование и утверждение технического задания на проведение ФСА.

2. *Информационно-аналитический этап* предполагает сбор и изучение информации по проектно-конструкторским решениям объ-

екта, затратам на его изготовление и эксплуатацию, вскрытым недостаткам его работы, перспективам развития объекта. На этом этапе проводится анализ и классификация функций объекта, определение и сравнение стоимости функций, выявление функциональных зон наибольшего сосредоточения затрат, постановка задачи поиска более рациональных и оптимальных конструкторско-технологических решений.

3. *Поисково-исследовательский этап* связан с поиском вариантов улучшенных технических решений и их параметров, с выбором оптимального варианта и оформлением результатов ФСА в виде технического предложения или последующих стадий проектирования, предусмотренных техническим заданием на ФСА.

4. *Этап внедрения результатов ФСА* связан с разработкой проектно-технологической документации и с организацией работы по реализации предложений.

Работы на информационно-аналитическом этапе выполняются в следующей последовательности:

- строят структурно-элементную модель объекта анализа;
- определяют его функции;
- выявляют назначение материальных носителей (узлов, деталей) в выполнении функций;
- строят иерархическую функциональную модель объекта, выявляют ненужные функции и отбрасывают их, экспертным путем устанавливают относительную значимость функций как на данном уровне иерархии, так и в обеспечении выполнения функции более высокого порядка, причем

$$\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1, \quad (4.9)$$

где r_{ij} — значимость j -й функции на i -м уровне; n — общее число функций на i -м уровне. Относительная значимость каждой функции в реализации главной функции:

$$R_{ij} = \prod_{i=1}^q r_{ij}, \quad (4.10)$$

где q — число уровней функциональной модели;

- определяют экспертным путем значимость материальных носителей в обеспечении выполняемых функций в виде коэффициента значимости α_{ij} ; $\alpha_{ij} = 1$, если функция обеспечивается одним материальным

носителем, $\alpha_{ij} < 1$, если материальный носитель обеспечивает несколько функций, при этом

$$\sum_{j=1}^v \alpha_{ij} = 1, \quad (4.11)$$

где v — число функций, обеспечиваемых данным материальным носителем;

- выявляют затраты на материальные носители, распределяют их по функциям, находят стоимость функции

$$S_{\Phi ij} = \sum_{l=1}^m (S_{\text{мн}l} \alpha_{ij}), \quad (4.12)$$

где $S_{\text{мн}l}$ — себестоимость материального носителя (детали, узла, агрегата); m — число материальных носителей, обеспечивающих ij -ю функцию;

- определяют относительную стоимость функции

$$S_{\text{от } ij} = S_{\Phi ij} / S, \quad (4.13)$$

где S — себестоимость объекта;

- строят функционально-стоимостную диаграмму, определяют функции, у которых относительная стоимость больше относительной значимости ($R_{ij} < S_{\text{от } ij}$). Материальные носители, обеспечивающие выполнение этих функций, требуют конструкторской доработки.

Пример. Функционально-стоимостной анализ выбранного варианта ЩОМ по приведенной принципиальной схеме на рис. 4.1 (вариант 2).

Функции и средства их реализации (носители) представлены в табл. 4.9.

4.9. Функции и средства их реализации

Обозначение	Функции	Носители	Себестоимость, тыс. руб.
F_1	Вырезка загрязненного балласта	Шнек	20
F_2	Перемещение балласта к месту очистки	Многоковшовый рабочий орган	80

Окончание табл. 4.9

Обозначение	Функции	Носители	Себестоимость, тыс. руб.
F_2	Перемещение балласта к месту очистки	Ленточный транспортер	30
		Ленточный транспортер	50
F_3	Очистка балласта	Виброгрохот	100
F_4	Перемещение очищенного балласта	Наклонный лоток	4
F_5	Перемещение загрязнителей	Наклонный лоток	6
F_6	Перемещение машины	Гусеничный трактор	400

Функциональная модель объекта имеет вид:

Главная функция ($i = 1$)	$\begin{array}{c} F_3 \\ r_{11} = 1 \end{array}$				
Основные функции ($i = 2$)	$\begin{array}{c} F_1 \\ r_{21} = 0 \end{array}$	$\begin{array}{c} F_2 \\ r_{22} = 0 \end{array}$	$\begin{array}{c} F_4 \\ r_{23} = 0 \end{array}$	$\begin{array}{c} F_5 \\ r_{24} = 0 \end{array}$	$\begin{array}{c} F_6 \\ r_{25} = 0 \end{array}$

На функциональной модели r_{ij} означает значимость j -й функции на i -м уровне, причем $\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1$.

Относительная значимость основных функций в реализации главной функции (R_{ij}) в соответствии с (4.10) при наличии двух уровней функций и одной главной функции равна r_{ij} .

Каждая из функций выполняется собственными носителями, поэтому значимость носителей по каждой функции a_{ij} равна 1.

Абсолютная величина стоимостного вклада носителей и относительная стоимость функций представлены в табл. 4.10. Оптовая цена машины принята 690 тыс. руб.

4.10. Ориентировочная стоимость носителей

Функции	Абсолютная величина стоимостного вклада носителей, тыс.руб.	Относительная стоимость функций
F_1	20	0,3
F_2	160	0,23
F_3	100	0,14
F_4	4	0,006
F_5	6	0,009
F_6	400	0,58

Из функционально-стоимостной диаграммы объекта проектирования видно, что только для одной функции, а именно для F_2 , ее относительная значимость меньше ее относительной себестоимости (рис. 4.17). Носители этой функции подлежат конструктивной доработке.

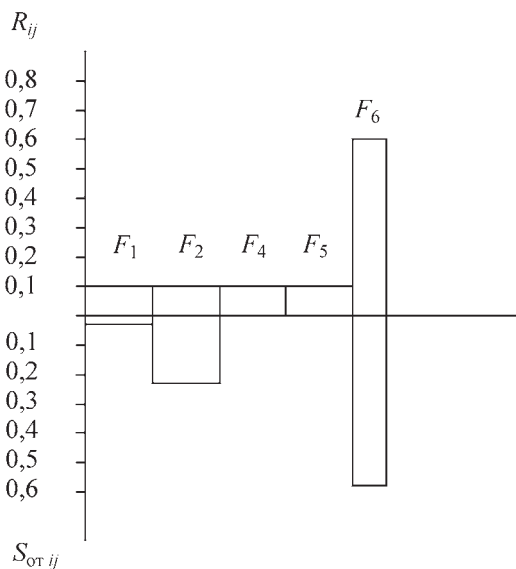


Рис. 4.17. Функционально-стоимостная диаграмма щетноочистительной машины

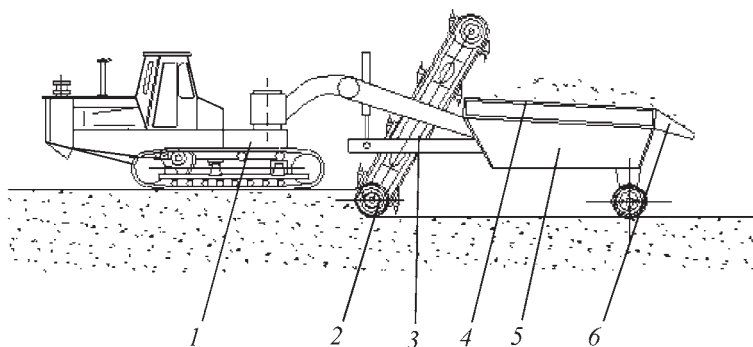


Рис. 4.18. Принципиальная схема щебнеочистительной машины после доработки:

1 — гусеничный трактор; 2 — шнек; 3 — многоковшовый рабочий орган; 4 — плоский виброгрохот; 5 — лоток для загрязнителей; 6 — лоток для очищенного щебня

На рис. 4.18 показан вариант такой доработки, в котором исключены ленточные транспортеры, как составные носители функции F_2 .

4.8. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ АНАЛИЗА ПРИНЯТОГО РЕШЕНИЯ

Среди программных продуктов для анализа принятого решения наиболее известен комплекс **ADAMS** (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems). Он предназначен для кинематического и динамического анализа механизмов и машин. Разработан комплекс компаний **Mechanical Dynamics, Inc.**

Комплекс **ADAMS** в России и СНГ представляет компания **CADFEM** с офисом в Москве. Комплекс нашел применение в авиационной, космонавтике, автомобилестроении, железнодорожном транспорте, в области общего машиностроения, двигателестроения, судостроения, робототехники, приборостроения, биомеханике.

Анализ в **ADAMS** проводится на предварительно созданных виртуальных моделях механических систем. Имеется возможность задавать вынужденные перемещения элементов модели, прикладывая к ним активные внешние силы и моменты, проводить статический, кинематический и динамический анализ. Параметризация позволяет анализировать влияние вариаций конструктивных элементов на поведение

моделей, оптимизировать их по заданному критерию. Результаты анализа представляются в виде графиков, таблиц, анимации.

Комплекс **ADAMS** имеет модульную структуру, может быть оформлен в различных комплектациях в соответствии с потребностями пользователей. Основа **ADAMS** — базовый пакет Full Simulation Package (FSP) — состоит из двух частей: **View** и **Solver**. Он дает возможность строить геометрическую модель объекта, задавать исходные данные, решать задачу и визуализировать ее результаты. Дополнительные модули ориентированы на определенные области техники.

ADAMS/View обладает набором инструментов для построения плоских и пространственных объектов на основе пакета трехмерного моделирования Parasolid. В моделях механизмов могут использоваться различные виды кинематических пар как идеальных, так и с учетом трения. Задаются начальные условия движения в кинематических парах, условия безотрывного движения одного геометрического объекта относительно другого. Параметризация геометрических, кинематических и массовых характеристик объекта позволяет исследовать его поведение при изменении этих характеристик.

ADAMS/Solver — («решатель») — описывает геометрическую модель в виде системы уравнений движения и разрешает эту систему. Параметрические модели могут оптимизироваться по заданным критериям. Постпроцессор **ADAMS** представляет полученные в результате работы решателя данные в виде графиков, таблиц. К этим данным относятся скорости, ускорения, реакции, моменты для любой точки любого звена механической системы. Возможно воспроизведение движения звеньев (анимация) в реальном масштабе времени.

Дополнительные модули **ADAMS**:

- **ADAMS/Flex** — обмен данными с программами конечно-элементного анализа;
- **Flexible Body Generator** — моделирование деформированных тел, произвольного сечения, методом экструзии;
- **ADAMS/Exchange** — импортирование моделей, созданных другими программными продуктами в форматах IGES, DXF/DWG, STEP, SAT, Parasolid, VDAFS, STL;
- **ADAMS/Linear** — линеаризация нелинейных уравнений, дающая возможность установить взаимосвязь больших перемещений звеньев с малыми колебательными движениями;
- **ADAMS/Hydraulics** — анализ гидравлических систем;
- **ADAMS/Controls** — объединение моделей механических систем с моделями их управления;

- **ADAMS/Durability** — обмен информацией о нагружении механизмов при ресурсных испытаниях;
- **ADAMS/Vibration** — виртуальный вибростенд;
- **ADAMS/Insight** — планирование и проведение численного эксперимента, обработка его результатов;
- **ADAMS/Animation** — анимационное представление результатов анализа;
- **ADAMS/SDK** — инструмент для использования математического аппарата ADAMS в прикладных программах, создаваемых пользователями.

Рассмотрим некоторые примеры использования комплекса ADAMS*.

В ОАО «ПКБВ» «Магистраль» используется прикладной модуль ADAMS/Rail для динамического анализа подвижного состава. На рис. 4.19 представлена одна из геометрических моделей подвагонной тележки.

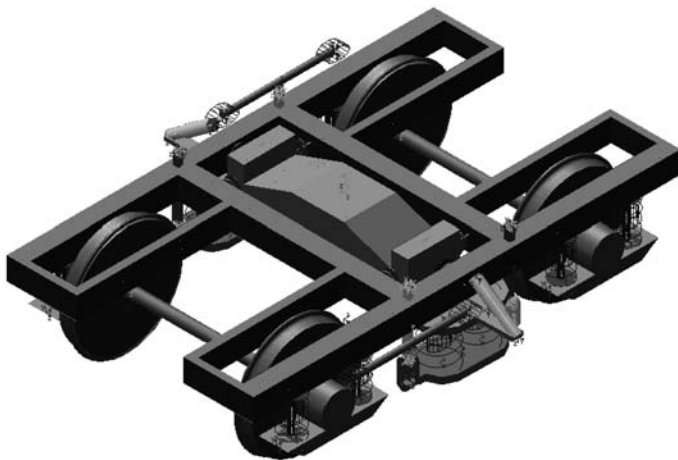


Рис. 4.19. Геометрическая модель тележки KB3-ЦНИИ (тип I)

На рис. 4.20 — геометрическая модель вагона с тележками KB3-ЦНИИ (тип I).

* Примеры заимствованы из материалов Пятой российской конференции пользователей MSC (Москва, октябрь 2002).

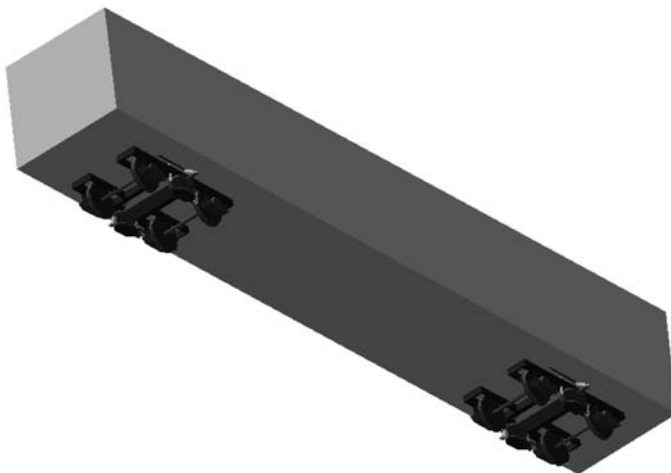


Рис. 4.20. Вагон с тележками КВЗ-ЦНИИ (тип I)

Анализу подвергались:

- вертикальные и горизонтальные перемещения кузова;
- вертикальные и горизонтальные перемещения тележки;
- вертикальные и горизонтальные ускорения кузова;
- вертикальные и горизонтальные ускорения тележки;
- усилия в демпферах;
- углы галопирования и виляния кузова;
- углы набегания;
- направляющие силы;
- другие перемещения, углы, усилия и моменты для работы конструкторов и расчетчиков.

На рис.4.21 представлен график поперечного смещения шкворня груженого кузова относительно рамы передней тележки при движении в прямой с периодическими неровностями на типовом пути при скорости 23,91 км/ч, полученный динамическим анализом с применением ADAMS/Rail.

Специализированная система динамического анализа железнодорожного подвижного состава MSC.ADAMS/Rail, адаптированная к условиям России в ОАО «ПКБВ «Магистраль», обеспечивает оценку динамики пассажирского вагона в соответствии с современными требованиями.

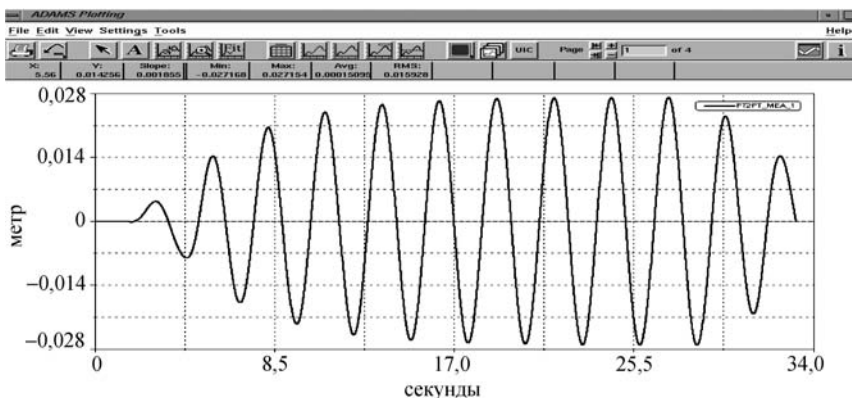


Рис. 4.21. График поперечного смещения шкворня груженого кузова относительно рамы передней тележки

Система MSC.ADAMS/Rail дает возможность исследовать подробные сложные нелинейные модели, которые наглядно представляют конструкцию и могут быть легко и быстро откорректированы.

Использование ADAMS на Минском автомобильном заводе дало возможность:

- моделировать, исследовать и оптимизировать отдельные системы автомобиля;
- исследовать устойчивость, управляемость и маневренность автомобилей;
- исследовать плавность хода автомобилей;
- исследовать нагруженность отдельных элементов автомобильной техники;
- исследовать напряженно-деформированное состояние деталей автомобиля.

На рис. 4.22 изображена виртуальная модель автомобиля, используемая для исследования его статической устойчивости.

Комплекс ADAMS относят к системам высокого уровня. Подобного рода системы называют тяжелыми. Они многое могут, но дорого стоят. Для анализа механических систем существуют системы среднего уровня. Рассмотрим одну из них. Это так называемый «Универсальный механизм», разработанный в Брянском государственном техническом университете под руководством проф. Д.Ю. Погорелова.

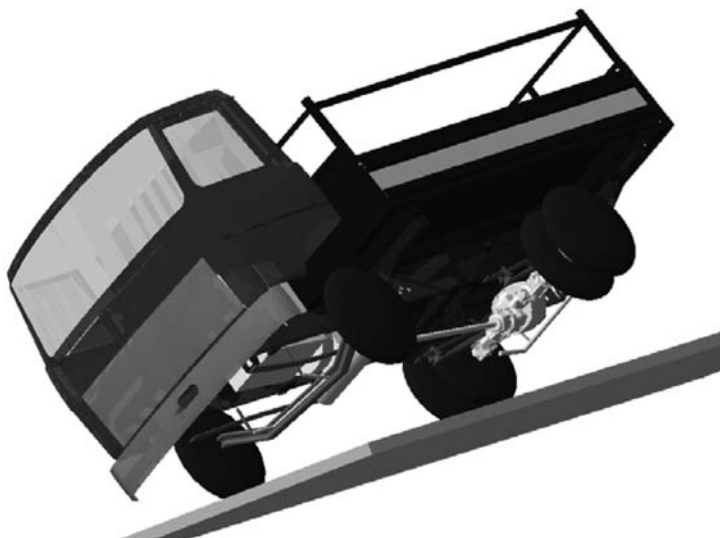


Рис. 4.22. Использование виртуальной модели для исследования статической устойчивости автомобиля

Комплекс предназначен для моделирования кинематики и динамики плоских и пространственных механических систем. Механизмы представляются системой абсолютно твердых тел, шарниров и силовых элементов. В результате анализа определяются координаты точек звеньев, скорости, ускорения, реакции в шарнирах и другие параметры.

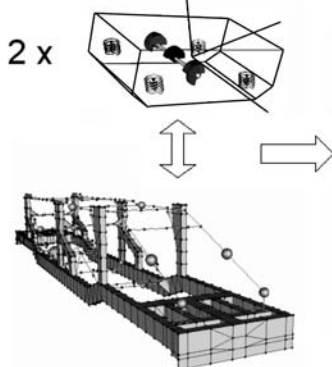
На рис.4.23 представлена модель рамы щебнеочистительной машины, используемая для динамического анализа средствами комплекса УМ «Универсальный механизм»*.

Геометрическая модель анализируемого объекта составляется из абсолютно твердых тел, связанных между собой шарнирами. Одно из тел выбирается в качестве базового и принимается неподвижным. Движение всех других тел рассматривается относительно базового. Каждое тело связано с прямоугольной декартовой системой координат, относительно которой тело неподвижно.

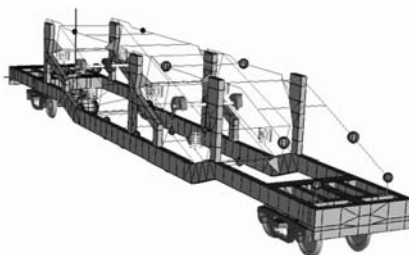
* Рисунок заимствован из демонстрационной версии комплекса «Универсальный механизм».

Щебнеочистной модуль ЩОМ 1200

Твердотельная подсистема «Грохот». Включает 7 тел, 4-линейных упругих и 4-линейных диссипативных внешних силовых элементов



Упругая подсистема «Рама». Узлов 1247, конечных элементов 1560, степеней свободы 7398



Гибридная модель
ЩОМ 1200

Universal Mechanism Loco

Рис. 4.23. Модель рамы щебнеочистительной машины

Задать положение в пространстве каждого тела означает указать положение его системы координат относительно базовой. Для того чтобы моделируемая система была связной, необходимо существование цепочки связных тел, по которой можно добраться от любого из них до базового.

В комплексе предусмотрены следующие типы шарниров:

- вращательный;
- поступательный;
- шарнир с шестью степенями свободы;
- обобщенный, объединяющий первые три типа шарниров;
- кватернионный, используемый для введения координат тела, свободно движущегося в пространстве или для представления шарового шарнира;
- связь в виде невесомого стержня, условный шарнир, ограничивающий относительное движение пары тел.

Для описания положения тел системы в комплексе используется понятие шарнирных координат, так что их задание определяет положение одного тела относительно другого.

На рис. 4.24 представлена модель кривошипно-шатунного механизма, образованная из тел в виде конусов, эллипсоидов и параллелепипеда и шарниров: вращательных и одного поступательного.

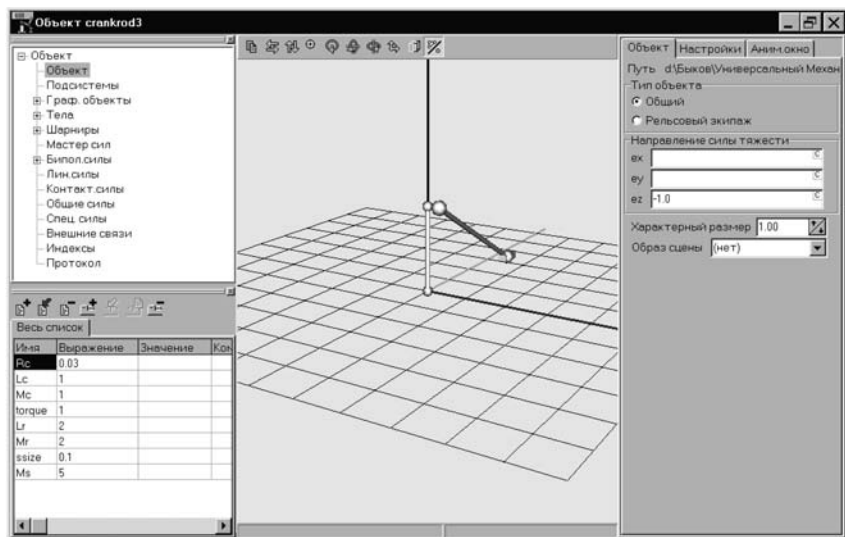


Рис. 4.24. Модель кривошипно-шатунного механизма

После синтеза уравнений и их компиляции смоделировано движение механизма в режиме анимации. Один из моментов процесса представлен на рис. 4.25.

Одно из приложений УМ связано с анализом динамики подвижного состава, куда входят многочисленные модели рельсовых экипажей и колесных пар, система гашения колебаний вагона, модуль для исследования контакта колеса с рельсом, модели сил крипа, модуль анимации контактных взаимодействий колеса с рельсом, модуль для создания профилей колеса и рельса, модуль для расчета и визуализации собственных частот и форм колебаний подвижного состава, модуль для оптимизации параметров подвижного состава с учетом устойчивости, износа колесных пар и технологичности.

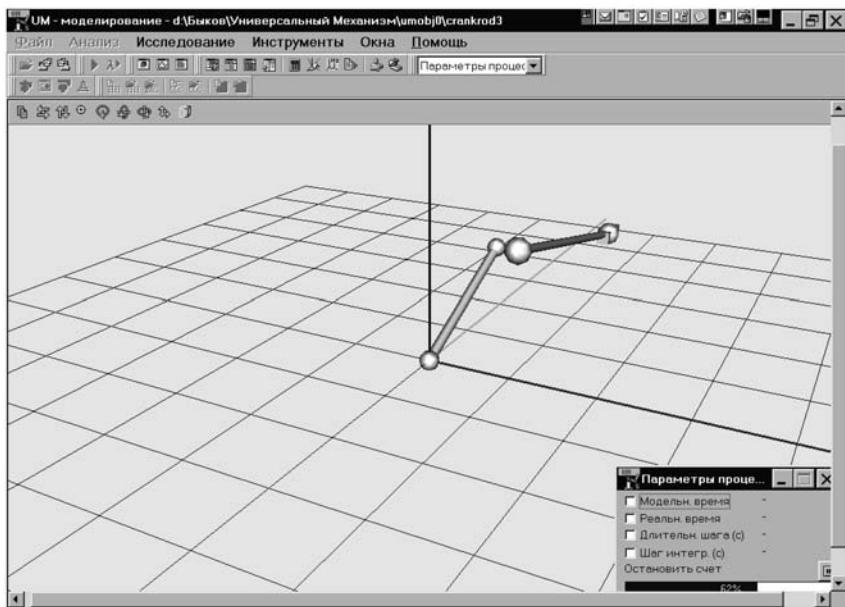


Рис. 4.25. Момент анимации движения кривошипно-шатунного механизма

Мощным средством анализа сложных динамических систем оказываются программные комплексы имитационного моделирования. Они дают возможность проводить вычислительные эксперименты с проектируемыми объектами. Благодаря своей близости к физическому моделированию они дают наглядное представление о поведении объекта.

Один из таких комплексов Model Vision Studium (MVS) разработан исследовательской группой «Экспериментальные объектные технологии» при кафедре «Распределенные вычисления и компьютерные сети» факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного технического университета. Комплекс представляет собой интегрированную графическую оболочку для быстрого создания интерактивных визуальных моделей динамических систем и проведения вычислительных экспериментов с ними.

Поведение исследуемого объекта имитируется ориентированным графом, названным картой поведения, в котором с узлами связано некоторое его состояние, а дуги означают переход к другому состоянию.

Состояние может характеризоваться непрерывным поведением, задаваемым в общем случае совокупностью обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\frac{ds}{dt} = f(s, t),$$

а также алгебраических уравнений вида $F(s, t) = 0$ и формул $s = \langle \text{выражение, не зависящее от } s \rangle$. Уравнения и формулы могут задаваться как в скалярной, так и в матричной форме.

Для примера рассмотрим имитационную модель подвески колеса. Ранее этот объект использовался для физического моделирования.

Поведение подвески принимается непрерывным и описывается обыкновенным дифференциальным уравнением. На рис.4.26 представлено окно редактора формул комплекса MVS с введенным уравнением движения подвески колеса.

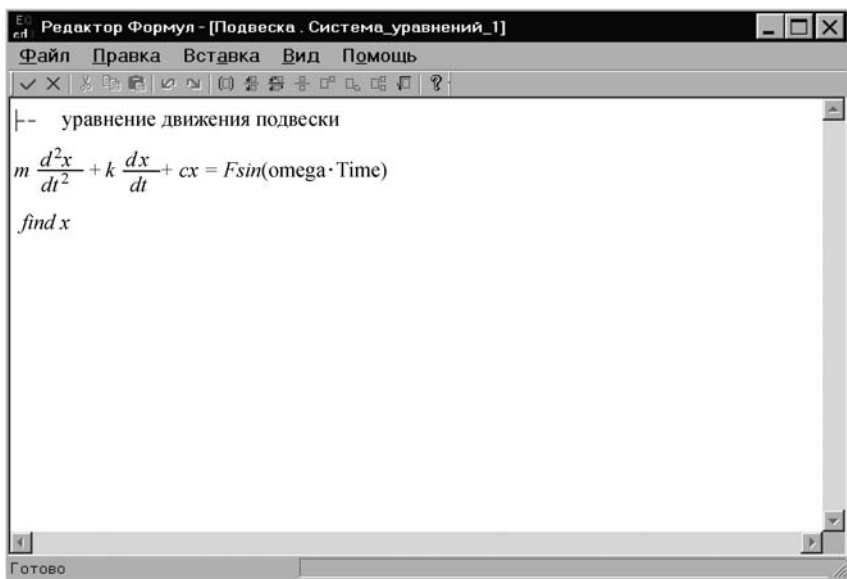


Рис. 4.26. Окно редактора формул:

m — масса колеса; c — жесткость рессоры; k — коэффициент демпфирования; F — реакция со стороны дороги; ω — частота возмущений со стороны дороги; Time — время

После создания и запуска модели подвески колеса представилась возможность получить временную диаграмму изменения положения колеса под воздействием внешнего возмущения со стороны дороги и трехмерное динамическое изображение (анимацию) модели (рис. 4.27).

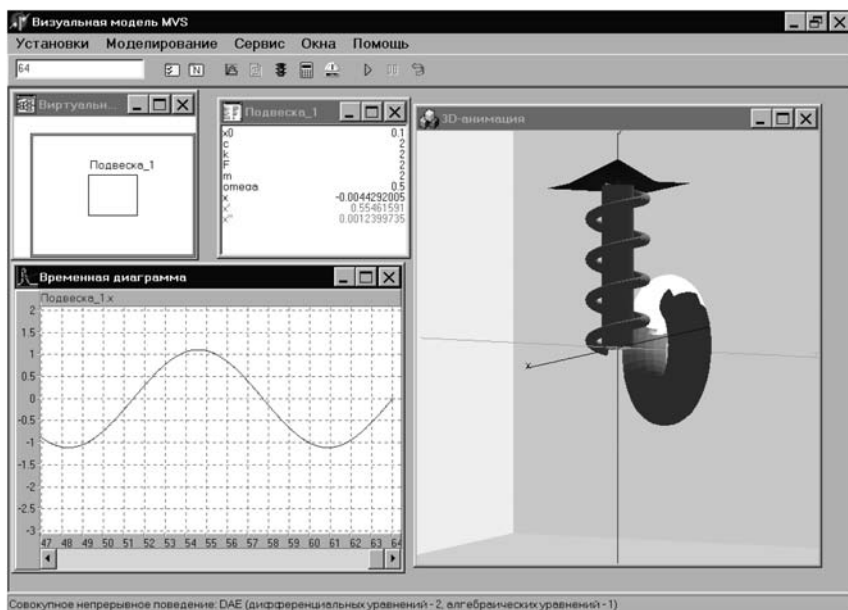


Рис. 4.27. Окно комплекса MVS, отображающее визуальную модель подвески колеса

Используем этот же комплекс для имитационного моделирования работы ЩОМ, представленного ранее в виде вычислительного эксперимента (см. рис. 4.16). Создадим гибридную модель системы «машина — балласт» с несколькими качественными состояниями: машина работает в нормальном режиме, машина работает при встрече с преодолимым препятствием, машина стоит из-за встречи с непреодолимым препятствием. Исходные данные для моделирования возьмем из вычислительного эксперимента. На рис. 4.28 представлено окно комплекса MVS с исходными данными.

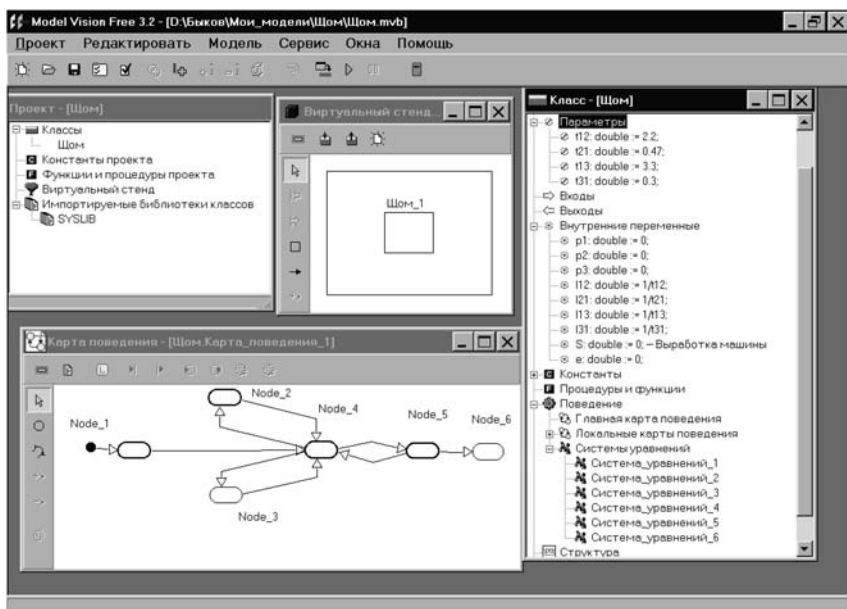


Рис. 4.28. Окно с исходными данными моделирования системы
«машина — балласт»

На карте поведения узел Node_5 отображает состояние непрерывной работы машины. Уравнение движения, введенное в редакторе формул для этого состояния, приведено на рис. 4.29.

Узел Node_2 соответствует состоянию работы машины при встрече с преодолимым препятствием. В этом случае теоретическая производительность уменьшается в два раза. Узел Node_3 отображает остановку машины на время устранения непреодолимого препятствия. В узле Node_1 выполняется решение уравнений Колмогорова (см. вычислительный эксперимент), а в узле Node_4 устанавливается случайное непрерывно распределенное число в пределах от 0 до 1. Стрелки на карте поведения означают переходы из одного состояния в другое. Переход из состояния Node_1 в Node_4 безусловен и произойдет, как только будет решена система уравнений, определяющая финальные вероятности состояний системы. Переход из узла Node_4 в Node_5, Node_2 или в Node_3 связан с условием попадания случайного числа в пределы числовой оси (см. вычислительный эксперимент), соответствующий со-

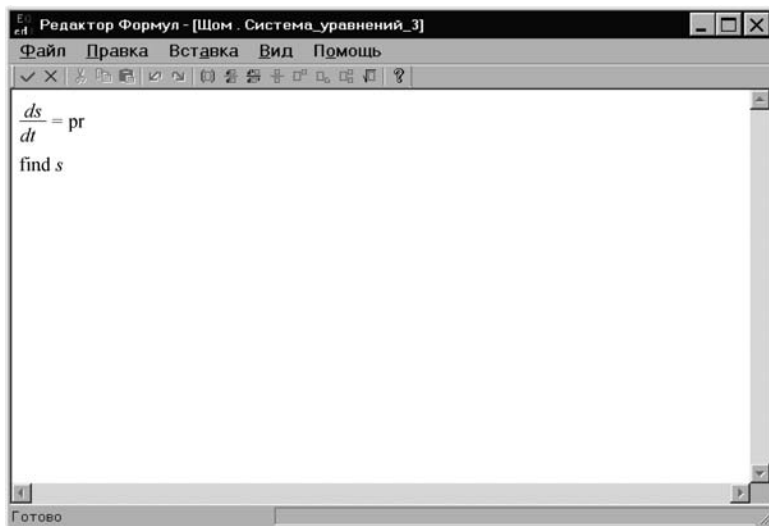


Рис. 4.29. Окно редактора формул с уравнением движения щетнеочистительной машины в нормальном состоянии:

s — часовая выработка машины, м^3 ;
 pr — теоретическая производительность ($20 \text{ м}^3/\text{ч}$)

стояниям непрерывной работы, работы с преодолением препятствия или простоя машины. Обратный переход из узла Node_5 в Node_4 происходит через заданный временной шаг, из узла Node_2 или Node_3 в Node_4 после времени пребывания в соответствующем состоянии.

На рис 4.30 представлено окно визуальной модели в начальном состоянии. На карте поведения выделен узел Node_1. В окне, расположенном слева от карты поведения, приведены результаты вычислений финальных вероятностей состояния системы (p_1, p_2, p_3) при заданных значениях времени пребывания в одном состоянии до перехода в другое ($t_{12}, t_{13}, t_{21}, t_{31}$).

На рис. 4.31—4.33 показаны окна, отображающие моменты эксперимента в состояниях системы непрерывной работы, преодоления препятствия и останова соответственно.

В результате имитационного моделирования с использованием комплекса MVS часовая выработка машины составила $17,05 \text{ м}^3$ при теоретической производительности $20 \text{ м}^3/\text{ч}$.

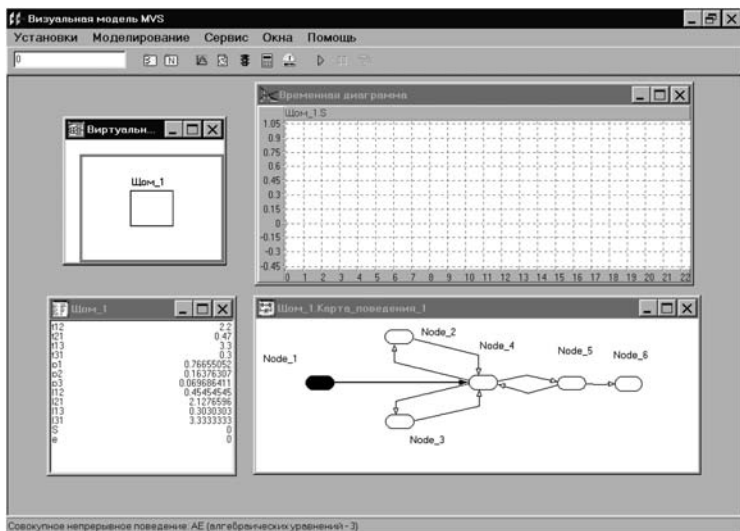


Рис. 4.30. Визуальная модель в начальном состоянии

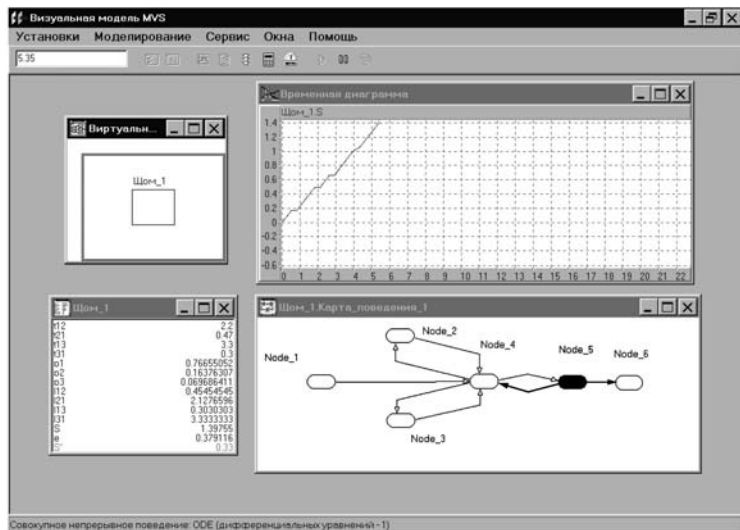


Рис. 4.31. Визуальная модель в состоянии непрерывной работы

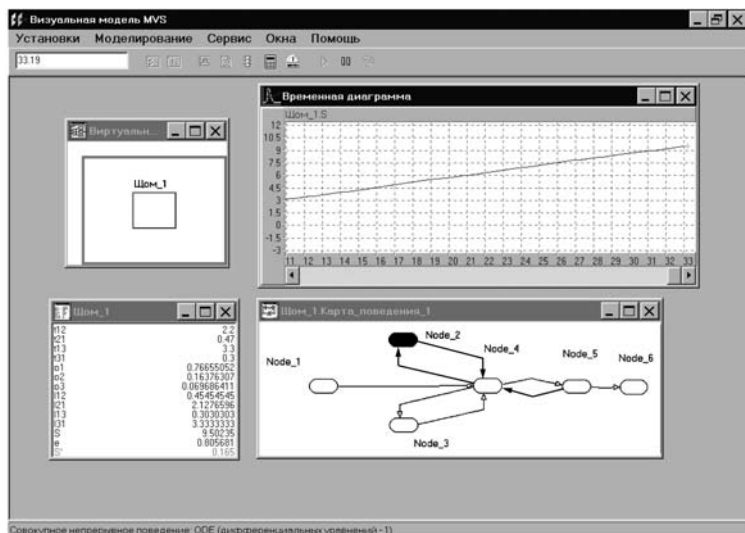


Рис. 4.32. Визуальная модель в состоянии преодоления препятствий

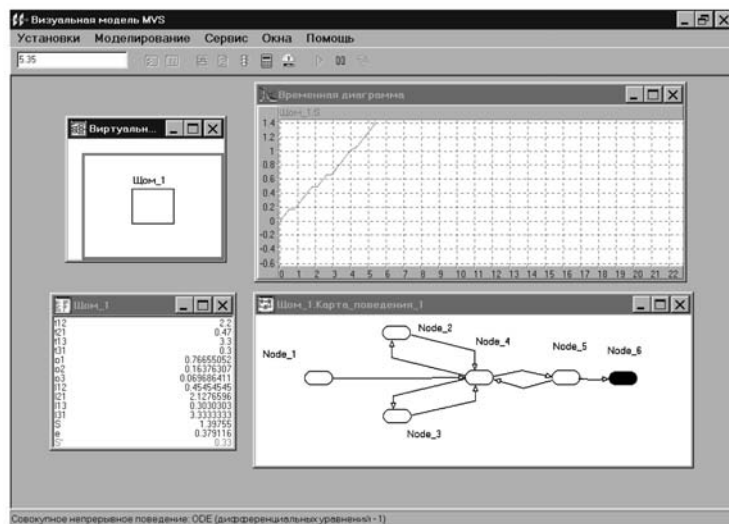


Рис. 4.33. Визуальная модель после завершения эксперимента

Глава 5

ПРОЦЕДУРЫ НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА

5.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА СТАДИИ 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.

Технические решения, представленные на этапе разработки технических предложений в виде принципиальных схем, теперь должны получить конструктивное решение. 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 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 наиболее успешный метод общей компоновки.

На стадии эскизного проекта: продолжаются 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

Под параметром объекта проектирования понимают количественное выражение какого-либо его признака (масса, скорость, размеры и т.д.). 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. 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. 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.

5.2.1. 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.

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 установления 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 центрированных 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 k_{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.

Масса полуприцепного одно моторного скрепера (без тягача) находится в зависимости от вместимости ковша:

$$G_c = (0,9...1,2)q,$$

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, развитый применительно к строительным машинам проф. В.И. Баловневым. Согласно этому методу, необходимо вначале среди машин параметрического ряда отыскать наиболее совершенный типоразмер [3]. Для этого можно воспользоваться некоторым обобщенным показателем эффективности. Далее машину-эталон принять за модель проектируемой, и по критериям подобия найти масштабные коэффициенты параметров.

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

$$q = (0,94...1,06)10,23t^{0,199},$$

где t — год в прогнозный период.

Мощность тягача в функции времени можно представить в следующем виде:

$$N = (0,96...1,04)(20,073 + 1,35t - 0,02t^2).$$

5.2.2. 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:

$$P_{\text{вх}} = \{\rho_{\text{вх } 1}, \rho_{\text{вх } 2}, \dots, \rho_{\text{вх } n}, t\};$$

$$P_{\text{вых}} = \{\rho_{\text{вых } 1}, \rho_{\text{вых } 2}, \dots, \rho_{\text{вых } m}, t\},$$

где $\rho_{\text{вх } i}$ — параметры условий эксплуатации; t — время; $\rho_{\text{вых } i}$ — параметры, характеризующие продукцию.

Машина, как система, описывается в виде функции эффективности

$$F = F(P_{\text{вх}} \rightarrow P_{\text{вых}}).$$

Под эффективностью понимается показатель, дающий возможность сравнить систему с другими ей подобными по величине превышения доходов над расходами. Показатели эффективности могут быть единичными и комплексными. Единичные показатели: производительность машины, удельная энергоемкость и материалоемкость, себестоимость единицы продукции и т. д. Комплексные показатели объединяют несколько единичных. Наиболее часто в качестве комплексного показателя используют приведенные удельные затраты:

$$Z_{\text{пр.уд}} = c_{\text{уд}} + E_{\text{н}}K_{\text{уд}},$$

где $c_{\text{уд}}$ — себестоимость единицы продукции; $E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; $K_{\text{уд}}$ — удельные капиталовложения.

При создании новой машины стремятся к повышению ее эффективности по сравнению с достигнутой. Выбор параметров должен

обеспечить оптимальное значение функции эффективности. В такой постановке задача определения параметров сводится к отысканию максимума функции эффективности, принимаемой за целевую функцию. Область поиска максимума целевой функции, как правило, ограничивается некоторыми дополнительными условиями. Локальный максимум целевой функции от одного действительного переменного параметра в данной области определения легко отыскать в том случае, если функция дифференцируема. Функция будет иметь в точке a локальный максимум, если $f'(a) = 0$ и $f''(a) < 0$.

Если эффективность есть дифференцируемая функция двух и более действительных переменных $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, то она может иметь локальный максимум в некоторой точке $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ в том случае, если

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} = 0; \quad \dots; \quad \frac{\partial f}{\partial x_n} = 0$$

и второй дифференциал есть отрицательно определенная квадратичная форма.

Поиск локального максимума функции n действительных переменных, подчиненных достаточно гладким дополнительным условиям в виде уравнений связи

$$\varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0;$$

$$\varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\varphi_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0,$$

можно упростить, используя множители Лагранжа λ_j .

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 использова-

ны 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. Повышение эффективности системы может быть связано и с уменьшением ее показателя (например, приведенные удельные затраты). В этом случае целевая функция подлжит минимизации.

Когда при выборе параметров машин целевая функция или ограничения оказываются нелинейными, возникает задача нелинейного программирования. Решение ее рациональнее всего вести численным методом.

Особую сложность вызывают задачи, в которых нельзя ограничиться для выбора параметров одним критерием. Для решения такого рода задачи используют метод Соболя—Статникова.

Проектирование реальных объектов 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 [39]. 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. Но это приводит к решению задачи, неадекватной исходной, и никакой метод оптимизации здесь не спасет [39].

Особенность предлагаемого метода — систематический просмотр многомерных областей (в качестве пробных точек в пространстве параметров используются точки равномерно распределенных последовательностей).

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 α_j^* , α_j^{**} — нижние и верхние границы параметра.

Ограничения (5.1) выделяют в пространстве параметров параллелепипед $\Pi_p = \{A_p | (1)\}$. Для двух параметров он условно показан на рис. 5.1.

В общем случае объем параллелепипеда

$$V_{\Pi} = (\alpha_1^{**} - \alpha_1^*) \times \dots \times (\alpha_n^{**} - \alpha_n^*).$$

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 Π_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 $\Phi_1(A_p), \dots, \Phi_k(A_p)$.

Примем, что по условиям задачи $\Phi_v(A_p)$ стремятся минимизировать; функции $\Phi_v(A_p)$ предполагаются непрерывными в Π_p ; вводится критериальное ограничение

$$\Phi_v(A_p) \leq \Phi_v^{**}; \quad v = \overline{1, k}. \quad (5.3)$$

Область пространства параметров (рис. 5.3), удовлетворяющая всем трем видам ограничений,

$$D_p = \{A_p | (1), (2), (3)\};$$

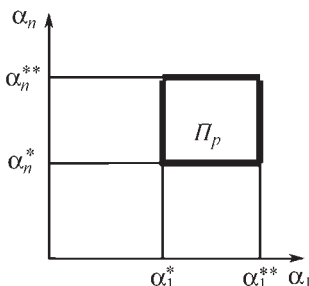


Рис. 5.1. Пространство параметров в условиях параметрических ограничений

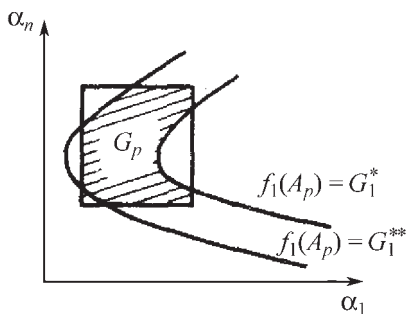


Рис. 5.2. Пространство параметров в условиях параметрических и функциональных ограничений

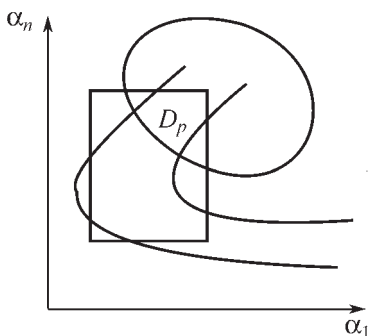


Рис. 5.3. Пространство параметров в условиях параметрических, функциональных и критериальных ограничений

Решение задачи сводится к нахождению точки $(\hat{A}_p)$ в области $\hat{D}_p$ такой, что

$$\Phi(\hat{A}_p) = \min \Phi(A_p); \quad A_p \in D_p. \quad (5.4)$$

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:

$$\Phi_v(A_{pi1}) \leq \Phi_v(A_{pi2}) \leq \dots \leq \Phi_v(A_{piN}).$$

В табл. 5.1, приведенной в качестве примера, показано размещение результатов испытаний объекта по двум критериям.

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 $\Phi_v(A_p)$.

5.1. 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

Этап 2. Выбираются критериальные ограничения. Конструктор просматривает таблицу испытаний по каждому критерию, назначает ограничения на Φ_v^{**} . Если Φ_v^{**} брать неоправданно малым, то множество допустимых точек может оказаться пустым.

Этап 3. Проверяется не пустота 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, вернув-

шись 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 $A_{p1}, \dots, A_{pN}$, 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

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (s_N(P_p) / N) = V_{\Pi},$$

где $s_N(P_p)$ — 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 ,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (s_N(\Pi_p) / N) = V_{\Pi} / V_{G}.$$

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 $j=1, n$ $\alpha_{i,j} = a_j + (b_j - a_j)q_{i,j}$ образуют равномерно распределенную последовательность в параллелепипеде Π_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 $A_p^i = (\alpha_j^{(i)}, \dots, \alpha_n^{(i)})$, принадлежащие Π_p :

$$\alpha_j^{(i)} = \alpha_j^{**} + (\alpha_i^{**} - \alpha_j^*)q_{i,j}; \quad j = \overline{1, n}; \quad q_{i,j} \in Q_i.$$

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.

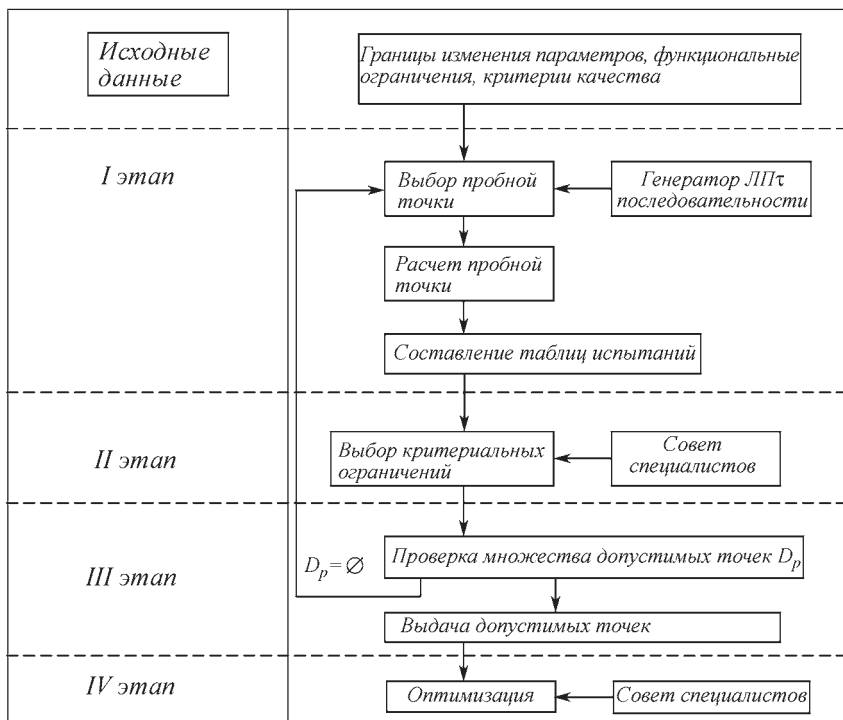


Рис. 5.4. Схема алгоритма выбора оптимальных параметров

Рассмотрим некоторые особенности метода. Если границы c_e^* и c_e^{**} в функциональном ограничении не абсолютны, т.е. могут быть изменены, то можно ввести псевдокритерий

$$\Phi_{k+1} = f_i(A_p).$$

Если, по мнению конструктора, среднее значение $\bar{c}_e$ было бы «весьма хорошим», то в качестве псевдокритерия удобно ввести величину

$$\Phi_{k+1} = |f_i(A_p) - \bar{c}_e|$$

или

$$c_e^* = \bar{c}_e - \Phi_{k+1}^{**}; \quad c_e^{**} = \bar{c}_e + \Phi_{k+1}^{**}.$$

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. $\alpha_p^* \leq \alpha_p \leq \alpha'_p$; $\alpha'_p \leq \alpha_p^{**}$. Введя 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

$$\lambda_v(A_{pi,2}) \leq \lambda_v(A_{pi,3}) \leq \dots \leq \lambda_v(A_{pi,N}).$$

Пример. В качестве объекта проектирования взят одноступенчатый редуктор [39]. Исходная модель представлена на рис. 5.5. 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.

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 фун-

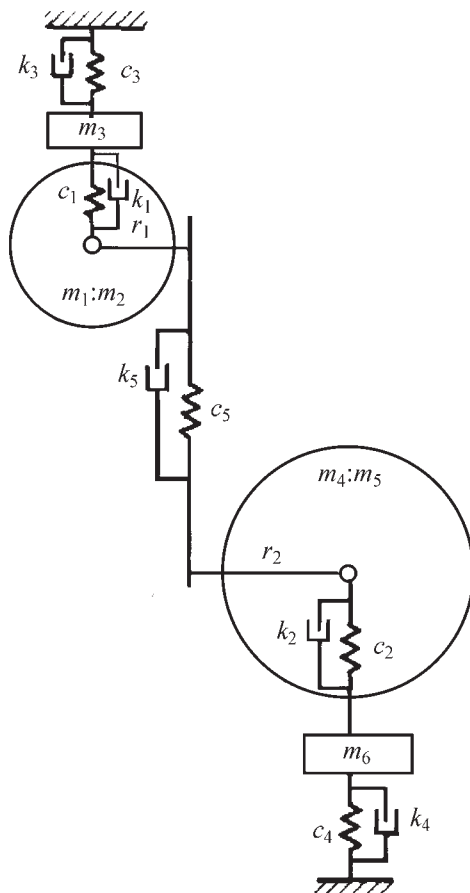


Рис. 5.5. Исходная модель одноступенчатого редуктора для выбора оптимальных параметров:

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; r_1, r_2 — радиусы колес

дамент $\Phi_9 = \bar{P}_3$, $\Phi_{10} = \max P_3$, $\Phi_{11} = \bar{P}_4$, $\Phi_{12} = \max P_4$; масса деталей вращения $\Phi_{13} = m_2 + m_5$; число собственных частот, попавших в рабочий диапазон, $f_{\text{нач}} \leq f \leq f_{\text{кон}}$ (Φ_{14}). Допустимые пределы варьирования каждого из параметров были указаны проектировщиком.

В качестве исходной точки A_{pi} 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 $\Phi_v = (\Phi'_p)$ 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 $\Phi_v = (\Phi'_p)$ — поиск прекращен.

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:

$$\Phi(A_{pi}) = F(\Phi_1(A_{pi}), \dots, \Phi_k(A_{pi})).$$

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 ис-

ключения 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 .

5.3. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ

Среди программного обеспечения для оптимизации параметров объекта проектирования следует в первую очередь назвать Excel, как наиболее доступное. Так с помощью средств Excel можно установить уравнение регрессии, связывающее случайные значения параметров объекта проектирования по известным его аналогам. Для этого используются статистические функции для определения уравнений линейной и нелинейной регрессии с установлением их достоверности. Полученное уравнение регрессии возможно использовать как целевую функцию или как функциональное ограничение при постановке задачи оптимизации параметров. Excel поддерживает методы линейного и нелинейного программирования, стохастического программирования, векторной оптимизации.

Параметрическая оптимизация входит отдельным модулем во все САЕ системы, например ADAMS. Есть подобный модуль и в комплексе УМ. Он включает в себя следующие основные компоненты:

- инструмент для сканирования пространства параметров;
- инструмент для оптимизации целевой функции одним из предусмотренных методов (Хука-Дживса, Нелдера-Мида, метода комплексов и др.);
- инструмент для построения поверхности отклика на основе теории планирования экспериментов и квадратической аппроксимации;

- вспомогательный инструмент для описания целевой функции и поддержки принятия решения на базе метода анализа иерархий;
- службу поддержки распределенных вычислений.

Сканирование заключается в проведении вычислительных экспериментов по определению значений целевой функции или функций в пространстве параметров, характеризующих модель объекта проектирования. Определенная комбинация значений параметров составляет альтернативу модели. Все альтернативы одной и той же модели называют семейством альтернатив.

Работа с проектом сканирования строится в следующей последовательности:

- пользователь описывает список моделей и иерархию их параметров;
- автоматически генерируется полный список альтернатив, который в случае необходимости может быть отредактирован пользователем;
- происходит выполнение экспериментов;
- представляются результаты экспериментов для последующего их анализа.

Анализ результатов экспериментов допускает построение осциллограмм, графиков, диаграмм с использованием возможности экспорта данных в табличный процессор Microsoft Excel.

При использовании сканирования пользователь должен учитывать размерность задачи (число параметров), так как число вычислительных экспериментов N оказывается равным $N = m^k$, где k — размерность задачи, m — число уровней варьируемых параметров.

5.4. 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 отображает 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 составных частей с размещени-

ем их конструктором; из 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 двумерных изображений. Функциональные агрегаты и конструктивные модули включаются в БД (лучше, если эта БД 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 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 проф. В.И. Баловнева разработана система автоматизированного конструирования конструктивно-размерно-подобных машин [3]. Прототипом для вычерчивания общего вида является геометрический образ машины-эталона. По нему создается база графических элемен-

тов, 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. 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 автоматизированной системе 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 БД составных частей. Сделать это могут лишь специалисты в области проектирования конкретных технических объектов.

В экспертной системе ЭКОН-1.0 варианты технического решения представляются в форме текстового описания, содержащего наименование частных функций и средств их реализации. Для графического отображения полученных вариантов разработана специальная программа, извлекающая из БД содержащиеся в ней средства выполнения частных функций и размещающая их на чертеже в соответствии с текстовым описанием.

Глава 6

ПРОЦЕДУРЫ НА СТАДИЯХ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА И РАБОЧЕЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

6.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА И РАБОЧЕЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

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, 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.

На этапе конструирования объекта инженер-конструктор работает совместно с дизайнером, добиваясь целостности и выразительности технической формы изделия. В данном случае оказывается полезным макетирование. Работа конструкторов подчинена одной общей цели — обеспечению требуемого уровня 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.

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 из-

вестных 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 устраняя некоторые отклонения в описании, добиваются унификации подсистем. Схема алгоритма конструирования объекта представлена на рис. 6.1.

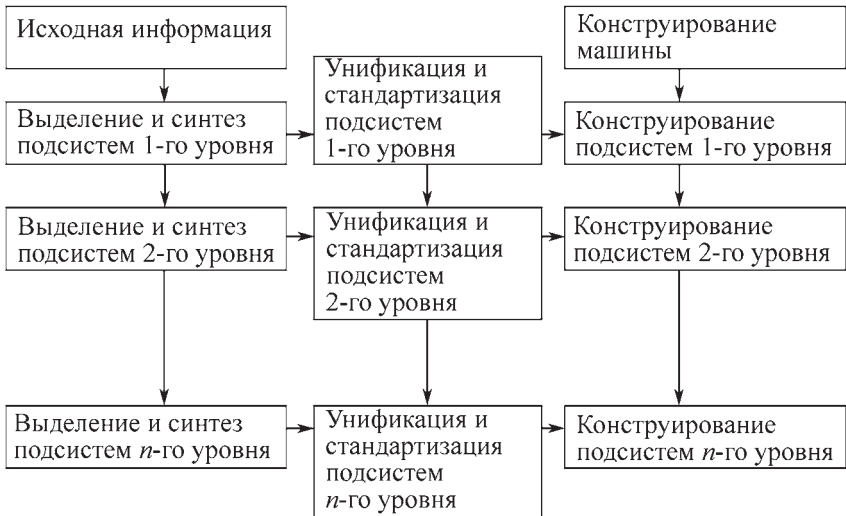


Рис. 6.1. Схема алгоритма проектирования

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 различным организациям и предприятиям. Она отражает достижения науки, техники, передовую технологию. Стандарты распространяются как на изделия и их составляющие части, так и на техническую документацию.

Решающее значение для проектирования имеет Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП), определяющая общий для всех отраслей порядок разработки технологической документации. В ЕСТПП как подсистемы входят Единая система конструкторской документации (ЕСКД) и Единая система технологической документации (ЕСТД).

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 ТЗ специальной процедурой. Теперь необходимо реализовать их в конструкции машины. Оработка на технологичность связана со снижением трудоемкости и себестоимости 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

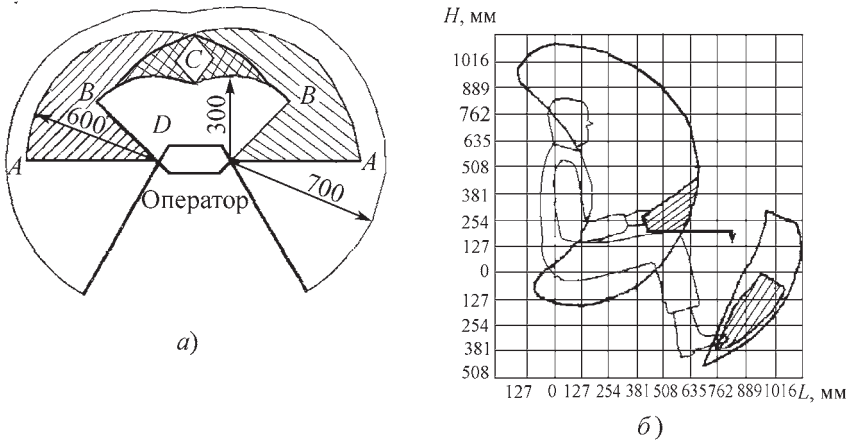


Рис. 6.2. Зоны досягаемости органов управления:

a — в горизонтальной плоскости; *б* — в вертикальной плоскости

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 поворотом 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 макетирова-

ние; 5) виртуальное моделирование. В последнее время используются трехмерные модели ОП для определения оптимальных эргономических показателей. В качестве примера можно назвать один из компонентов комплекса DELMIA V5, имеющий название Human Workplace Design & Analysis. Этот компонент позволяет проанализировать эргономические свойства ОП на базе моделирования взаимодействия человека с ОП. Комплекс позволяет создавать типовые манекены людей (женщин и мужчин с именем, полом и другими характеристиками). Структура трехмерной модели манекена включает в себя 99 независимых связей, сегментов и овальных тел. В дополнение ко всему позы манекена могут быть полностью управляемы путем перемещения рук, плеч, спины и шеи для точного воспроизведения реалистичного движения человека. Манекен может быть интерактивно позиционирован с использованием компаса или путем выбора объекта, до которого он должен дотянуться. Прямые кинематические манипуляторы могут быть использованы для более точного позиционирования манекена путем прямого перемещения отдельных его сегментов в зависимости от степени свободы данного сегмента. Средство оценки диаграмм обзора манекена позволяет технологу оценить то, что оператор или специалист технического обслуживания сможет увидеть в данном рабочем окружении. Отдельное окно показывает диаграмму обзора и то, что оператор видит. Такая диаграмма позволяет определить, какие объекты находятся в поле зрения конкретного работника.

Комплекс имеет простой интерфейс подразумевающий, что анализ может проводить не специалист в области эргономики.

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 изделий существенно влияет на технические показатели (самолет, гребной винт, сверло и т. д.). Форму изделия в этом случае определяет 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) прин-

цип 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.

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.

Системное проектирование построено 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, эффективность 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).

Основным достижением системного подхода можно считать выработку предельно допустимых норм деятельности оператора, превышение или понижение которых вызывает нежелательные отклонения в его состоянии. 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, 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 формулой:

$$C_{\Sigma} = \mu \sum_{i=1}^n C_i,$$

где μ — коэффициент, учитывающий расходы на сборку; C_i — себестоимость основных подсистем.

Часть себестоимости, приходящуюся на подсистему управления C_y , 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 предполагает предварительный выбор требуемых показателей. Сегодняшний уровень инженерной

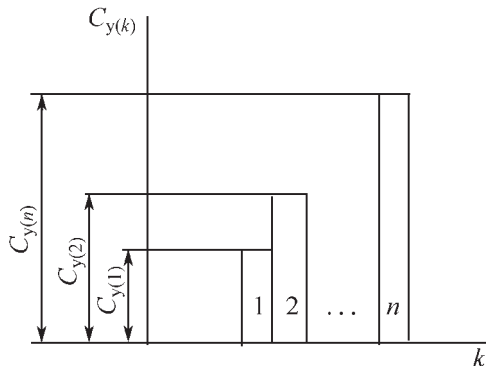


Рис. 6.3. Диаграмма уровней комфорта в кабине управления

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.

Под оптимальной стоимостной характеристикой уровня комфорта понимают 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 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.

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. В этом случае конструктор создает модель ОП, а системы автоматизированного проектирования производят (при необходимости): детализовку, ведомости покупных изделий, программы для ЧПУ и многие другие операции. Конструктору в этом случае отводится творческая роль, а роль чертежника принимают на себя системы САПР.

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 выявить 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. Каждое описание типовой структурной компоновки в базе данных включает спецификацию составных частей. Для идентификации типовых структурных компоновок можно использовать единую обезличенную 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. Структурная компоновка в виде трехмерной модели может быть сохранена как элемент текущего проекта. На ее базе подсистемы САПР при необходимости могут сделать детализировки или программы для станков с ЧПУ для изготовления спроектированного узла.

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 апробирован-

ные 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, клиноремменных и цепных передач, шлицевых и шпоночных соединений.

6.3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Основным средством конструирования в настоящее время является чертеж, изображающий изделие в прямоугольных проекциях. Основные правила выполнения чертежей, текстовых документов и спецификации определены ГОСТ. 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. При ручном конструировании для ускорения работы применялись различные средства: трафареты, лекала, специальные треугольники, штриховальные приборы, механизированные рейсшины, чертежные приборы пантографной и координатной систем. Для преобразования графической информации, например, для построения изометрического изображения по ортогональным проекциям, применяются перспектографы, аксонографы, аффинографы.

В современных условиях возможности всех перечисленных средств механизации труда конструктора могут быть реализованы системой автоматизированного проектирования.

Конструирование в системе САПР может вестись двумя способами: точным построением и методом параметрических изменений.

Применяя первый способ, конструктор строит изображение, пользуясь определенными графическими примитивами: отрезок, линия, дуга, окружность, прямоугольник, многоугольник, эллипс, полилиния, сплайн и др. При этом он сразу определяет параметры этих примитивов. Для изменения построенного изображения (редактирования) приходится его перестраивать, удалять определенную его часть и строить новую. Можно отредактировать размеры, но изображение при этом не меняется.

Второй способ позволяет создавать геометрию объекта без указания точных параметров с последующим нанесением размеров, в результате чего объект автоматически перестраивается в соответствии с этими размерами. Первоначальный этап такого построения напоминает эскизирование (рис. 6.4). Для того чтобы в процессе перестройки по заданным параметрам объект сохранил определенные закономерности своего строения, необходимо ввести помимо размеров некоторые отношения его элементов (рис. 6.5). На принципе параметризации построены программы для создания геометрической объемной модели объекта с последующим выполнением на ее основе проекционных чертежей.

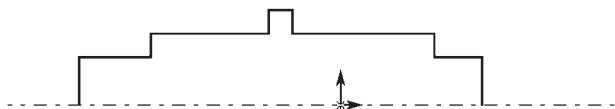


Рис. 6.4. Начальная стадия создания эскиза

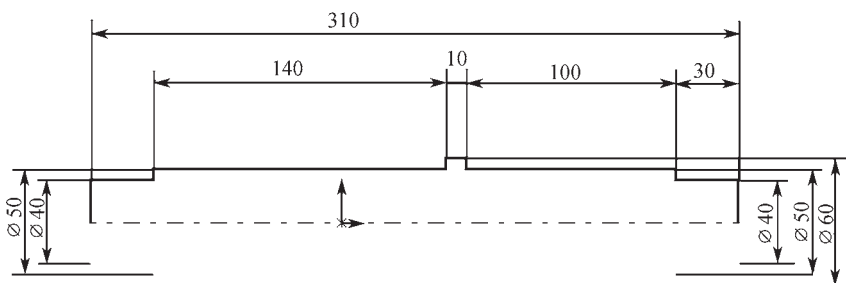


Рис. 6.5. Эскиз вала после нанесения размеров и отношений

Рис. 6.6 содержит изображение вала, полученное путем твердотельного моделирования вращением контура вокруг оси.

Помимо такого способа получения твердотельной модели может быть применено «выдавливание» эскиза в третье измерение или его перемещение вдоль заданной кривой. В дальнейшем модель может быть достроена добавлением или удалением новых элементов с помощью логических (булевых) операций. Такие конструктивные элементы, как фаски, скругления наносятся непосредственно на модель. Твердотель-

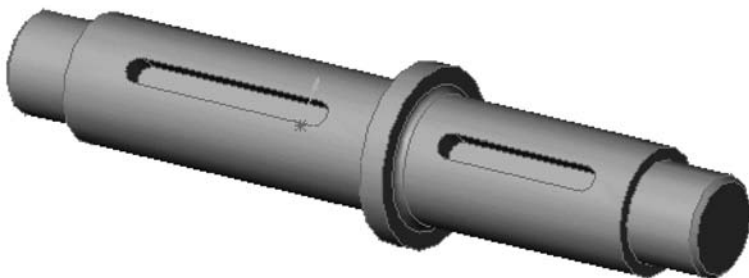


Рис. 6.6. Твёрдотельная модель вала

ная модель наделяется свойствами реального объекта, имеет массу, инерционные характеристики.

По твердотельной модели в полуавтоматическом режиме создается чертеж. На рис. 6.7 приведен чертеж вала, полученный по модели после построения разреза и редактирования размеров путем переноса их с одного вида на другой и удаления дублирования.

Модели деталей могут включаться в сборку. Одна из них задается как базовая, все остальные присоединяются к ней. По полученной сборке оформляется сборочный чертеж и спецификация.

Геометрические построения деталей первым или вторым способом позволяют выполнять многие программы и программные комплексы (системы). В зависимости от функциональных возможностей их относят к легким (нижнего уровня), средним и тяжелым (верхнего уровня).

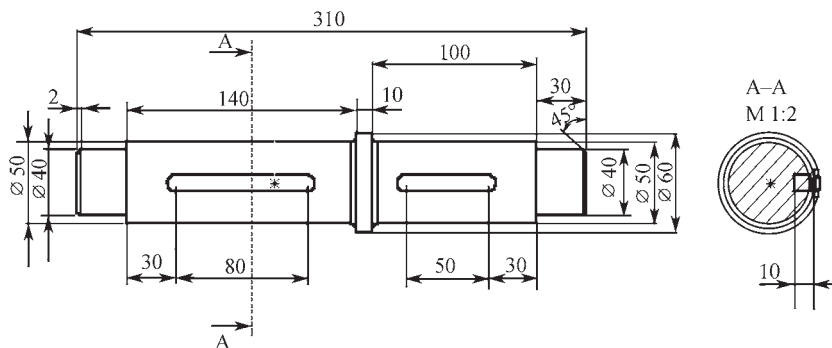


Рис. 6.7. Чертеж вала, построенный по модели

Системы нижнего уровня имеют ограниченные функциональные возможности и чаще всего предназначены только для конструирования. Это так называемые CAD-системы. К ним можно отнести: AutoCAD, TopCAD, Caddy, Компас-2D, APM WinMachine. В России широкое распространение получила линия современных программных систем конструирования фирмы Autodesk. Программа AutoCAD нашла в России самое широкое распространение. Ее главное назначение — подготовка чертежей по первому способу их разработки. Она позволяет строить и трехмерные объекты (3D), однако это не главное ее предназначение. Система Mechanical Desktop этой же фирмы напротив ориентирована на параметрическое 3D-моделирование с последующим оформлением 2D-документации (чертежей). В состав системы входят:

AutoCAD — базовый графический пакет, включающий твердотельное моделирование;

AutoCAD Designer 2.0 — параметрическое моделирование трехмерных твердотельных объектов;

AutoSurf 3.0 — моделирование однородных и неоднородных трехмерных поверхностей;

AutoCAD IGES — транслятор обмена файлами графических данных с другими системами САПР.

Однако время однофункциональных систем прошло. Теперь конструкторы предпочитают универсальные системы, предназначенные не только для конструирования, но и для инженерных расчетов (CAD/CAE-системы), для технологической подготовки производства (CAD/CAM-системы). Система APM WinMachine (НТЦ «Автоматизированное проектирование машин») предназначена как для конструирования первым способом, так и для проведения инженерных расчетов:

- энергетических и кинематических параметров;
- прочности, жесткости и устойчивости;
- выносливости при переменных режимах нагружения;
- надежности и износостойкости;
- динамических характеристик.

Система имеет модульную структуру, каждый модуль может использоваться самостоятельно или в комбинации с другими. Рассмотрим основные модули.

APM Graph-2D — графический редактор для оформления конструкторской документации и для подготовки исходных данных при работе некоторых других модулей системы. Построение объектов чертежа ведется с использованием набора примитивов. Существует возможность привязки к контрольным точкам: конец отрезка, центр

дуги и окружности, середина отрезка. Новые геометрические объекты могут быть сориентированы относительно уже построенных: параллельно, перпендикулярно, касательно. Каждый примитив может задаваться несколькими способами. Точные его параметры можно ввести в специальном диалоговом окне. Используются различные типы линий. Размеры проставляются в автоматическом и неавтоматическом режимах. Для указания допусков можно воспользоваться специальной библиотекой. Символы для обозначения допусков, базы, шероховатости и другие отвечают ГОСТ.

Для удобства оформления таблиц предусмотрен специальный редактор. Отдельные объекты чертежа можно объединить в блоки с последующим их использованием как единого целого.

Имеется возможность распределить объекты чертежа по слоям. Слои можно включать и выключать, т.е. делать их видимыми и невидимыми, блокировать и разблокировать, не допуская или допуская внесение изменений в объекты, расположенные в слоях.

APM Graph позволяет параметрическое задание графических объектов. Система, сохраняя в своей памяти последовательность выполнения команд при первоначальном построении и воспринимая их атрибуты как переменные, в состоянии перестроить объект при изменении значений атрибутов. Атрибутам можно придавать имена, присваивать числовые значения, описывать функциональными соотношениями в виде произвольных аналитических функций. Для задания функций предусмотрен специальный редактор.

Обладая большинством возможностей всех 2D-редакторов, APM WinMachine выгодно отличается от многих из них тем, что в состоянии оформлять чертежи в соответствии с ЕСКД.

APM Joint — модуль конструирования и расчета соединений охватывает:

- отдельные и групповые резьбовые соединения: болты, винты, шпильки при различном внешнем нагружении;
- сварные соединения: стыковые, тавровые, нахлестные, выполненные точечной сваркой;
- заклепочные;
- соединения деталей вращения; шлицевые, штифтовые, коническими кольцами, клеммовые различного конструктивного исполнения, профильные, соединения с натягом.

На этапе проектировочного расчета определяются размеры соединения, а при проверочном расчете устанавливаются коэффициенты запаса прочности.

Диалоговый интерфейс позволяет варьировать параметрами соединений, добиваясь оптимальных решений.

APM Shaft — модуль конструирования и расчета валов и осей. Он позволяет определить реакции в опорах вала или оси, изображенных с помощью специального редактора, построить эпюры поперечных сил и моментов, отобразить напряженное и деформированное состояние вала или оси, найти коэффициент запаса по усталостной прочности, частоты собственных колебаний.

APM Trans — модуль для конструирования, расчета и подготовки чертежей деталей передач:

- цилиндрических зубчатых колес с прямым зубом для внешнего и внутреннего зацепления;
- цилиндрических зубчатых колес с косым зубом для внешнего зацепления;
- шевронных зубчатых колес;
- конических зубчатых колес с прямым и круговым зубом;
- деталей червячного зацепления;
- ременного и цепного зацепления.

Исходные данные для проектировочного расчета передач включают кинематические (передаточное отношение, угловая скорость) и энергетические (передаваемый момент) параметры, а также параметры, характеризующие условия работы и нагружения, требуемый ресурс и другие.

В результате работы модуля определяются все геометрические параметры передачи и готовятся данные для автоматического выполнения чертежа деталей передач с возможностью внесения необходимых изменений в пределах модуля и окончательным оформлением средствами редактора APM Graph. Помимо перечисленных возможностей модуля с его помощью можно имитировать процесс нарезания зубьев зубчатых колес методом обкатки и процесса зацепления.

APM Bear — модуль для расчета подшипников. Он позволяет провести проверочный расчет после выбора типа и параметров подшипника. В результате определяются жесткость, наибольшие контактные напряжения, силы, действующие на тела качения, показатели долговечности, потеря мощности, тепловыделение. Методика расчета, заложенная в модуль, учитывает возможные погрешности в изготовлении подшипника. Рассчитываются наиболее распространенные типы подшипников. Возможно учесть неравномерность нагрузки во времени. Результаты расчета представляются различным способом: в форме таблицы, гистограммы, пространственного поля положения центра подшипника, гра-

фиков, иллюстрирующих изменение параметров в зависимости от угла поворота подшипника. Для наглядности работы подшипника модуль позволяет создать анимацию его движения.

APM Drive — модуль для выбора параметров и конструирования редуктора содержит специальный редактор для представления кинематической схемы редуктора: ее создание, ввод исходных данных, включающих передаточное отношение, момент на ведомом валу, угловую скорость на ведомом валу, показатель долговечности. Кроме того, могут быть заданы: режим нагружения, термообработка материала зубчатых колес, материалы валов, а также некоторые ограничения, например модуль, межосевое расстояние, числа зубьев, угол наклона зубьев, коэффициент смещения и другие.

Модуль APM Drive вызывает в процессе своей работы другие модули — APM Trans для расчета зубчатых передач, APM Shaft для расчета валов, APM Bear для подбора подшипников, APM Graph для выпуска чертежей редуктора. Для выбора стандартных деталей используется единая для всей системы APM WinMachine база данных APM Data.

Редуктор, представленный в виде параметрической модели, можно корректировать, внося изменения в диаметры валов, нанося фаски, галтели, шпоночные канавки, шлицы. При повторном расчете будут учтены все внесенные изменения.

APM Plain — модуль для расчета подшипников скольжения охватывает подшипники радиальные, работающие в режиме жидкостного и полужидкостного трения, упорные (подпятники) с жидкостным трением. В результате использования модуля устанавливается:

- распределение радиальных и осевых зазоров;
- оптимальное значение зазора;
- параметры системы смазки (толщина смазочной пленки, максимальная и средняя температура масла, расход масла);
- действительный коэффициент трения и потери на трение;
- конструкционные параметры.

APM Screw — модуль для расчета винтовых передач охватывает: винтовые передачи скольжения, шариковые винтовые передачи, планетарную винтовую (роликовую винтовую) передачу. Модуль позволяет учесть влияние погрешности изготовления передач на их выходные параметры на основе теории неидеального контакта. Выходные параметры модуля: перемещение (жесткость), показатели долговечности, момент трения, наибольшие контактные напряжения, потери мощности, параметры тепловыделения, силы, действующие на тела качения,

коэффициент полезного действия, параметры, связанные с ошибками позиционирования.

Модуль позволяет смоделировать поведение винтовой передачи с учетом заданных условий неидеального контакта поверхностей: шероховатости и погрешности формы. Результаты расчета представляются в виде таблиц со статистическими характеристиками, гистограмм компонент перемещений, пространственного поля положений центра гайки, анимации движения гайки. Силы, действующие на тела качения, отображаются в виде эпюры или в виде графика. Расчеты выполняются для любой комбинации осевой и радиальной сил и момента изгиба. Учитывается возможный осевой и радиальный преднатяг. Внешние нагрузки могут быть переменными, представленными в виде графика с помощью специального графического редактора.

APM Spring — модуль для расчета и конструирования упругих металлических элементов охватывает: цилиндрические пружины растяжения круглого и прямоугольного поперечного сечений, цилиндрические пружины сжатия, цилиндрические пружины кручения, тарелчатые пружины сжатия, плоские прямоугольные пружины, торсионы. Учитываются как постоянные, так и переменные нагрузки. При проектировочном расчете определяются геометрические размеры упругих элементов, при проверочном — запасы прочности в зависимости от геометрических размеров. По результатам расчетов модуль позволяет оформить чертеж для использования в графическом редакторе APM Graph или другом 2D-редакторе, поддерживающем формат DXF.

APM Cam — модуль для расчета и конструирования кулачкового механизма. Профиль кулачка устанавливается в зависимости от заданного закона движения толкателя, диаметр — от ограничений, накладываемых на угол давления. Радиус и толщина ролика толкателя выбирается с учетом допустимого напряжения в точке контакта. Исходные данные для расчета задаются или графиком перемещений толкателя, или графиком скорости, или графиком изменения ускорения толкателя в зависимости от угла поворота кулачка. В результате работы модуля можно рассчитать профиль кулачка, представив его в декартовых или полярных координатах, установить закон изменения угла давления в функции угла поворота кулачка, смоделировать работу механизма, используя анимацию, построить чертеж кулачка.

APM Slider — модуль для кинематического и динамического анализа рычажных механизмов. Кинематическая схема рычажного механизма строится в параметрическом виде с помощью специального редактора. Закон движения ведущего звена задается в виде графика или

аналитической функции. Модуль позволяет определить: траектории движения, скорости и ускорения точек механизма, реакции в шарнирах и динамические нагрузки.

APM Beam — модуль для расчета балки. Специальный редактор модуля может задать конструкцию балки, включая геометрию ее поперечного сечения, ввести нагрузки, вид опор и их расположение, задать массу и моменты инерции для расчета поперечных и крутильных колебаний. В результате с помощью модуля удастся установить для конкретной конструкции балки:

- реакции в опорах;
- распределение моментов и углов изгиба по длине балки;
- распределение моментов и углов поворота при кручении;
- распределение поперечных и продольных деформаций;
- распределение эквивалентных напряжений;
- распределение эквивалентных напряжений;
- распределение поперечных сил;
- карты напряжений в любом произвольном сечении по длине балки;
- частоты собственных колебаний.

APM Truss — модуль для расчета ферм содержит специализированный редактор для представления конструкции фермы, расположения опор и нагрузок. Расчет ведется методом конечных элементов. В результате определяются напряжения и деформации элементов ферм. Полученные данные могут быть представлены в табличной или графической форме.

APM Fem2D — модуль для расчета на прочность плоских деталей методом конечных элементов. Специальный графический редактор модуля позволяет построить объект, приложить к нему закрепления и нагрузки. Последние могут быть как сосредоточенными, так и распределенными, расположенными как в плоскости объекта, так и по нормали к нему. Расчет дает возможность установить напряженное и деформированное состояние объекта, температурные поля в условиях стационарной теплопроводности.

В число задач, решаемых с помощью модуля, входит кручение стержня, нагруженного изгибающим моментом с поперечными силами.

Результаты расчета представляются в графической и табличной формах.

APM Structure3D — модуль для расчета напряженно-деформированного состояния стержневых, пластинчатых и их комбинаций, оболочных и твердотельных конструкций и их комбинаций. Расчет ведется методом конечных элементов. Интерфейс модуля включает: графиче-

ский редактор для отображения конструкции, визуализатор для пространственного представления объекта, редактор задания плоских сечений стержневых элементов, библиотеку стандартных профилей, редактор задания нагрузок, условий закрепления и механических характеристик элементов конструкции, визуализатор результатов расчета.

Результаты расчета представляются в визуальной форме и отображают: напряженно-деформированное состояние объекта в целом, напряженно-деформированное состояние в любом сечении элементов, графики функций, описывающих моменты изгиба и кручения, напряжения и деформации, поперечные силы по длине любого стержня, входящего в конструкцию.

APM Data — модуль, представляющий базу данных, включает следующие разделы:

- машиностроительные детали общего назначения;
- конструктивные элементы;
- сортаменты;
- материалы;
- нормальные размеры;
- точность изготовления, чистота обработки, допуски и посадки;
- электрические двигатели;
- элементы оформления чертежей;
- элементы гидро- и пневмосхем;
- элементы строительного черчения;
- элементы электрических схем.

В разделе «Машиностроительные детали общего назначения» можно найти параметры болтов, винтов, валов, втулок, гаек, корпусов редукторов, крышек подшипников, маслоуказателей, передач вращения, стаканов, шайб, шлицев, шплинтов, шпонок, штифтов и других деталей машин.

Раздел «Конструктивные элементы» содержит стандартные размеры канавок, проточек, галтелей.

В соответствующих разделах можно найти размеры поперечных сечений прокатных профилей, нормальные значения линейных и угловых размеров, параметры конусности, таблицы для выбора чистоты обработки, допусков и посадок, параметры и графическое отображение электродвигателей, условные обозначения элементов гидро-, электро- и пневмосхем. Помимо этого в разделе «Элементы оформления чертежей» содержатся форматы, штампы, форма спецификации.

APM Data является информационным обеспечением всех входящих в систему APM WinMachine модулей.

Таковы основные особенности системы APM WinMachine. Расчетные модули системы позволяют добиваться оптимальных решений, достигая это варьированием параметров. В качестве одного из критериев оптимальности можно использовать достижение равнопрочности элементов конструкции.

Систему можно рекомендовать для начального освоения автоматизированного проектирования.

По мере освоения автоматизированного проектирования конструктору становится мало использовать только плоское конструирование, желательно увидеть объект в объеме, тем более что иногда для сложных деталей трудно построить их проекции. Современные программные средства способны удовлетворить эти желания. Более того, стремление к сокращению сроков освоения новых изделий требует тесной связи конструирования и технологической подготовки производства. Систем, отвечающих этим требованиям, достаточно много. Рассмотрим особенности их работы на примере системы ADEM.

ADEM — Automatic Design Engineering Manufacturing (Автоматизированное Черчение, Проектирование, Производство). Система создана фирмой Omega technologies ltd., основанной несколькими фирмами: московской «Элгра» — автоматизация проектно-конструкторских работ; ижевской «Крона» — разработка программ для станков с ЧПУ; швейцарской «Pantransit AG» — финансовая деятельность, маркетинг и реклама и израильской «Bee P.Graft» — разработчик и производитель сложной машиностроительной оснастки.

Начиная с версии ADEM 4.01 в основу моделирования была положена ACIS, математическая система, используемая во многих передовых программных продуктах, например: AutoCAD, Autodesk Inventor, Cimatron, IronCAD, CAD KEY, чем была достигнута совместимость со всеми современными системами проектирования и анализа, поддерживающих форматы данных: SAT, IGES, VDA, DXF, STL. В дальнейшем стало возможным использовать форматы BMP, TIF, JPG.

Система сертифицирована ГОССТАНДАРТОм России как удовлетворяющая нормативным документам ГОСТ, ИСО и МЭК.

ADEM — интегрированная CAD/CAM система. Это означает, что она обладает единым конструкторско-технологическим пространством. Модель объекта, создаваемого в этой системе, содержит и конструкторскую, и технологическую информацию, причем конструкторское изменение влечет за собой автоматическое или полуавтоматическое изменение в технологии изготовления.

Система включает три основных модуля: CAD, CAM, TDM. Модуль CAD служит для создания чертежей и объемных моделей, CAM — для создания управляющих программ станков с ЧПУ, TDM — для оформления конструкторской и технологической документации. Дополнительные модули системы предназначены для настройки на различные виды технологического оборудования, для контроля качества обработки изделия, для управления архивом конструкторских и технологических документов.

Модуль CAD позволяет выполнять детализовочные и сборочные чертежи объекта, создавать его объемную модель.

6.4. РАСЧЕТ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В современных условиях процесс многовариантного проектирования уже невозможен без использования расчетных систем, которые позволяют конструкторам проверить как проектируемые ими машины и механизмы поведут себя в реальной жизни, испытывая статические и динамические нагрузки. Подобный анализ дает возможность проектировщику подобрать оптимальную конструкцию.

Расчетные модели, лежащие в основе программных комплексов, называют CAE (Computer Aided Engineering) системами и используют для анализа и оценки функциональных свойств проектируемых узлов и деталей. Эти комплексы охватывают широкий круг задач моделирования упругонапряженного, деформированного, теплового состояния, колебаний конструкции, стационарного и нестационарного газодинамического и теплового моделирования с учетом вязкости, турбулентных явлений, пограничного слоя. Наиболее распространены CAE-системы, использующие решение систем дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов (МКЭ) [25].

Подобные расчеты практически невозможны без применения современной техники.

В основе любого расчета на прочность лежит расчетная схема, отображающая геометрию конструкции, действующие нагрузки. Используя те или иные гипотезы прочности с учетом свойств материала конструкции, определяются напряжения и деформации ее элементов, устанавливаются наиболее опасные сечения.

Расчетная схема строится на физической модели конструкции. Физическая модель допускает идеализацию свойств конструкции и внешних воздействий. Так металлическое твердое тело представляется

Квадратная матрица

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

называется единичной.

Матрица, определитель которой равен нулю, называется сингулярной.

Инверсия (обратная матрица) $\mathbf{A}^{-1}$ квадратной и не сингулярной матрицы $\mathbf{A}$ ($\det \mathbf{A} \neq 0$) определяется следующим выражением:

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{I}.$$

Например,

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{(ad-bc)} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}.$$

Решение системы линейных уравнений ($x = \mathbf{A}^{-1}b$) заключается в нахождении инверсии квадратной матрицы коэффициентов.

Обратимся к матричной форме записи основных соотношений теории упругости. В общем случае деформации и напряжения в материале конструкции состоят из компонент (рис. 6.8) напряжения: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ и деформации: $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$.

Для плоского напряженного состояния

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (\epsilon_z \neq 0);$$

$$\epsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \quad (\sigma_z \neq 0).$$

Для упругих изотропных материалов

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \epsilon_{x_0} \\ \epsilon_{y_0} \\ \gamma_{xy_0} \end{Bmatrix},$$

где E — модуль упругости; G — модуль сдвига; ν — коэффициент Пуассона; ϵ_0 — начальные деформации.

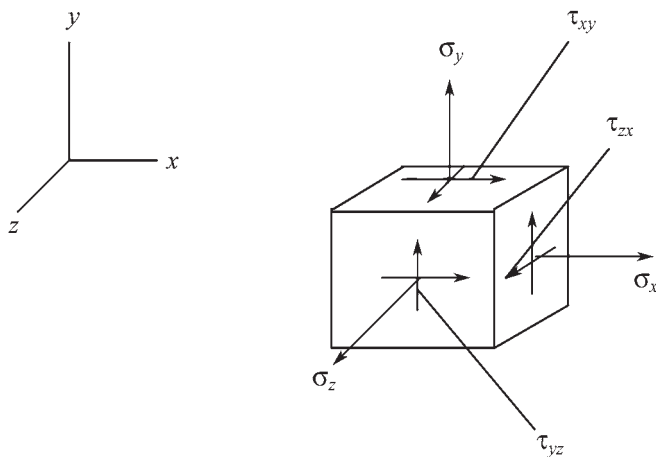


Рис. 6.8. Компоненты напряжений

Под воздействием нагрузки точки материала смещаются относительно друг друга. Вектор перемещений для плоской задачи

$$\{u\} = \{u_x, u_y\}.$$

Для малых перемещений и деформаций

$$\varepsilon_x = \partial u_x / \partial x; \quad \varepsilon_y = \partial u_y / \partial y; \quad \gamma_{xy} = \partial u_x / \partial y + \partial u_y / \partial x.$$

Напряжения в элементе объема должны удовлетворять следующим уравнениям равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_x = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + f_y = 0,$$

где f_x и f_y — объемная сила (например, сила тяжести) на единицу объема.

Метод КЭ возник в результате стремления к определению деформаций и перемещений в любой точке сложной пространственной конструкции. Он появился в 50-х гг. прошлого столетия в связи с космическими исследованиями. Основа его — строительная механика и теория упругости. МКЭ следует считать приближенным методом решения задач теории упругости. В дальнейшем благодаря математическому обоснованию он превратился в общий метод численного решения дифференциальных уравнений или систем дифференциальных уравнений.

Основная идея МКЭ заключается в следующем. Поскольку невозможно сразу определить деформации и напряжения в любой точке конструкции, она разбивается на отдельные элементы, названные конечными, связанные друг с другом в отдельных узловых точках.

Для каждого элемента устанавливается «функция формы» — некоторый полином, определяющий зависимость смещений точек внутри элемента от смещений в узловых точках. По смещению определяются деформации и напряжения внутри элемента, а затем и все поле деформаций и напряжений по всей конструкции. Таким образом, главное в МКЭ — это определение смещений в узлах.

Пример*. Ступенчатый стержень с двумя элементами одинаковой длины l и площадью поперечного сечения A_1 и A_2 жестко заделан одним концом и нагружен на другом конце осевым усилием P (рис. 6.9).

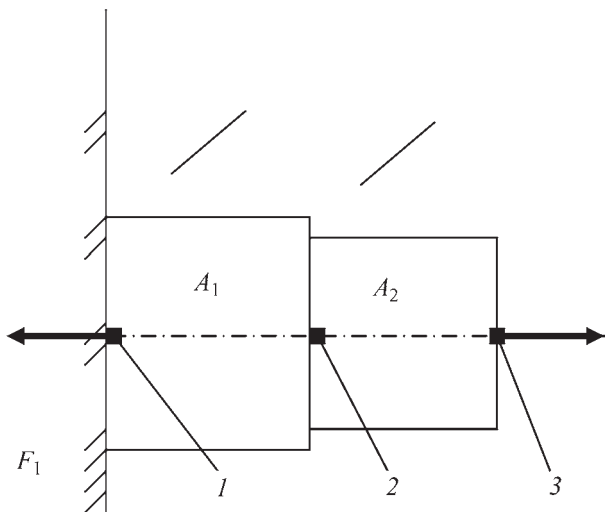


Рис. 6.9. Схема нагружения стержня

Определим перемещения в сечениях 1, 2, 3.

Рассмотрим один элемент (рис. 6.10).

* Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003.

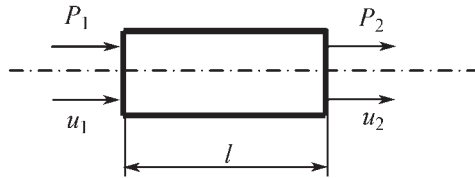


Рис. 6.10. Элемент стержня

В его узлах расположены фиктивные силы P_1 и P_2 . Обозначим перемещение узлов, вызванные приложенными силами, u_1 и u_2 .

Воспользуемся соотношениями

$$P_1 = \frac{EA}{l}(u_1 - u_2); \quad P_2 = \frac{EA}{l}(u_2 - u_1)$$

или в матричной форме

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \frac{E}{l} \begin{bmatrix} A & -A \\ -A & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$$

или

$$\{P\} = [K]\{u\}, \quad (6.1)$$

где $[K]$ — матрица, связывающая узловые усилия и перемещения, называемая матрицей жесткости элемента.

По аналогии с выражением (6.1) уравнение равновесия для всего стержня имеет вид

$$\{F\} = [K]\{u\},$$

где F — вектор действующих сил; u — вектор перемещений в узлах; K — матрица жесткости всего стержня.

Имеем:

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} -F_1 \\ 0 \\ P \end{Bmatrix}; \quad \{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}.$$

Узел 2 свободен от внешних нагрузок.

Матрица жесткости всего стержня получается «сшивкой» матрицы жесткости элементов. При этом главные диагонали матриц жесткости элементов должны находиться на главной диагонали глобаль-

ной (общей) матрицы и стыковаться в узле соединения элементов (узел 2):

$$[K] = \begin{bmatrix} A_1 & -A_1 & 0 \\ -A_1 & A_1 + A_2 & -A_2 \\ 0 & -A_2 & A_2 \end{bmatrix}.$$

Таким образом

$$\frac{E}{l} \begin{bmatrix} A_1 & -A_1 & 0 \\ -A_1 & A_1 + A_2 & -A_2 \\ 0 & -A_2 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ 0 \\ P \end{bmatrix}.$$

Если $u_1 = 0$, то

$$\frac{E}{l} \begin{bmatrix} A_1 & -A_1 & 0 \\ -A_1 & A_1 + A_2 & -A_2 \\ 0 & -A_2 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ 0 \\ P \end{bmatrix};$$

$$-\frac{EA_1}{l}u_2 = -F_1;$$

$$\frac{E}{l}((A_1 + A_2)u_2 - A_2u_3) = 0;$$

$$\frac{F}{l}(-A_2u_2 + A_2u_3) = P;$$

$$u_3 - u_2 = \frac{Pl}{EA_2}; \quad u_3 = \frac{Pl}{EA_2} + u_2;$$

$$(A_1 + A_2)u_2 - A_2u_3 = 0;$$

$$(A_1 + A_2)u_2 - \frac{Pl}{E} - A_2u_2 = 0;$$

$$A_1u_2 - \frac{Pl}{E} = 0; \quad u_2 = \frac{Pl}{EA_1}; \quad u_3 = \frac{PL}{E} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right);$$

$$F_1 = P.$$

Полагаем, что перемещение u внутри элемента изменяется линейно вдоль оси

$$u(x) = \left(1 - \frac{x}{l}\right)u_i + \frac{x}{l}u_j,$$

т.е. для первого элемента

$$u(x) = \left(1 - \frac{x}{l}\right)u_1 + \frac{x}{l}u_2.$$

Относительная деформация

$$\varepsilon = \frac{u_2}{l} = \frac{P}{EA_1};$$

напряжение

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Так для сечения с узлом 2, для которого

$$\varepsilon = \frac{u_2}{l} = \frac{P}{EA_1}; \quad \sigma = \frac{P}{A_1}.$$

В сечении с узлом 3

$$\varepsilon = \frac{u_3 - u_2}{l} = \frac{P}{EA_2}; \quad \sigma = \frac{P}{A_2}.$$

Программный комплекс ANSYS представляет собой многоцелевой пакет для решения сложных проблем физики и механики. Позволяет проводить анализ прочности конструкции под воздействием различного нагружения, включая тепловое, электромагнитное и др.

Решение задач с помощью ANSYS состоит из трех этапов: предпроцессорная подготовка, получение решения, постпроцессорная обработка результатов.

Предпроцессорная подготовка включает выбор типа расчетов, построение модели, приложение нагрузок, определение граничных условий, выбор типа конечных элементов, определение упругих постоянных, физико-механических свойств материала.

Постпроцессорная обработка представляет результаты расчета в форме графиков, таблиц, цветового отображения полей напряжению.

Точность выполнения расчетов во многом зависит от типа и размеров конечных элементов. Различают линейные стержневые КЭ для моделирования ферм, пружин, стержней и т.п., плоские двумерные КЭ —

для пластин, тонких оболочек, мембран т.п., объемные трехмерные КЭ — для конструкций в виде массивных тел (рис. 6.11).

Некоторые типы КЭ могут иметь непрямолинейные стороны с узлами, расположенными не только по концам или вершинам элемента (рис. 6.12).

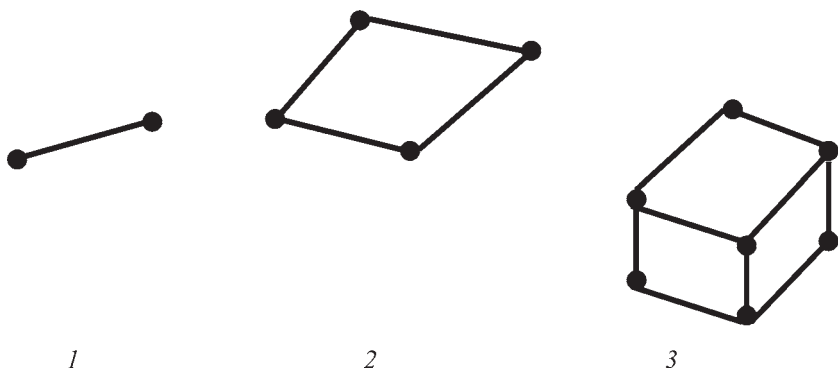


Рис. 6.11. Типы КЭ с прямолинейными сторонами:

1 — линейный стержневой КЭ; 2 — плоский двумерный КЭ; 3 — объемный КЭ



Рис. 6.12. Конечные элементы с нелинейными сторонами

Конечные элементы с нелинейными сторонами и с промежуточным расположением узлов обеспечивают большую точность расчетов, но требуют большего машинного времени.

Разбиение физической модели конструкции на конечные элементы осуществляется нанесением на нее сетки и узлов. Каждая ячейка сетки очерчивает конечный элемент. Сетка может быть упорядоченной и произвольной (рис. 6.13). Упорядоченная сетка (1) наносится пользователем. При этом вначале модель конструкции разбивается на отдель-

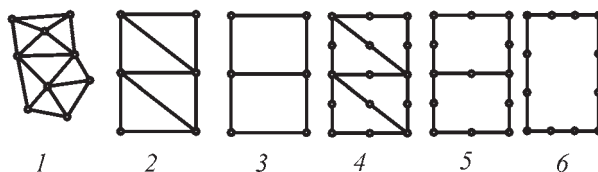


Рис. 6.13. Конечно-элементная модель

ные составные части с простой геометрией. Для каждой части выбирается тип и атрибуты элементов. Упорядоченная плоская сетка может содержать только четырехугольные или треугольные элементы, а объемная — только шестигранные элементы.

Произвольная сетка наносится автоматически. Она использует треугольные (2), (4), четырехугольные и четырехгранные элементы (3), (5), (6). Пользователь может указать общие размеры элементов, размеры элементов вблизи заданных геометрических точек, коэффициенты растяжения или сжатия элементов вдали от указанных границ, ограничения на кривизну элементов, «жесткие» точки положения узлов вместе с размерами сетки в такой точке.

Ячейки двумерной сетки превращаются в трехмерные объекты методом экструзии (выдавливания).

Построение конечно-элементной модели может осуществляться непосредственно в интерактивном режиме указанием положения каждого узла и элемента. Допускается редактирование сетки за счет изменения размеров КЭ. При этом программа автоматически производит контроль правильности изменений параметров сетки.

ANSYS обладает возможностью адаптивного построения сетки. После создания модели и указания граничных условий программа генерирует КЭ-сетку, выполняет расчет и оценивает ошибку за счет дискретизации объема. В дальнейшем автоматически меняется размер сетки до тех пор, пока ошибка не станет меньше некоторой наперед заданной величины.

Опыт использования МКЭ показал (см. рис. 6.13), что:

- упорядоченная сетка (1) по точности расчетов более предпочтительна, чем произвольная (2);
- прямоугольная сетка с четырехугольными элементами (3) обладает преимуществом по сравнению с треугольными (2);
- сетка из треугольных элементов с промежуточными узлами (4) равнозначна сетке с прямоугольными элементами (3);

- сетка с промежуточными узлами в прямоугольных элементах (5) предпочтительней аналогичной сетки с треугольными элементами (4);
- аппроксимация смещений кубическим полиномом (6) не требует более мелкой сетки.

При выборе размеров конечных элементов для повышения точности результатов анализа следует предвидеть участки конструкции, где ожидается большой градиент деформаций или напряжений, и назначать на этих участках более частую сетку по сравнению с участками с постоянными деформациями или напряжениями. При этом размеры соседних ячеек сетки не должны отличаться друг от друга более чем в два раза. Недопустимы слишком узкие и вытянутые элементы. В сетке не должно быть разрывов. В четырехугольных элементах углы не могут превышать 180° .

Не менее важное значение для точности результатов расчета имеет задание граничных условий на перемещения и силы в узлах. Граничные перемещения могут быть нулевыми и не нулевыми. Силы — только сосредоточенными. Число граничных условий в узле не должно превышать число его степеней свободы и быть минимально необходимым. Не следует прикладывать силу в узле в том же направлении, в каком в этом узле ограничено смещение.

Различают два метода КЭ-анализа: h -метод (h — длина стороны конечного элемента) и p -метод (p — порядок полинома функции формы). Для повышения точности расчетов с применением h -метода необходимо увеличивать число конечных элементов, с применением p -метода — увеличивать порядок полинома.

На рис. 6.14 представлена конечно-элементная сетка дискретизации модели зубчатого колеса*. Использована процедура REFINE для локального сгущения сетки вблизи контактных поверхностей. Сетка гексаэдров и призм построена с использованием алгоритма Sweep mesh. Для контактирующих поверхностей использована квадратичная аппроксимация на сетке из 8 узловых контактных элементов, для тела зуба использован модифицированный элемент типа SOLID95 с удаленными средними узлами (средние узлы оставлены только на контактирующих поверхностях). Общее число узлов составило 280 976, число элементов 234 891.

В программе ANSYS реализуются следующие виды прочностных расчетов: статический, динамический, гармонический, модальный, спектральный и расчет устойчивости. Вид расчетов определяет тип разрешающих уравнений для решаемой задачи.

* Расчет выполнен инженерами CAD-FEM GmbH с применением пакета ANSYS.

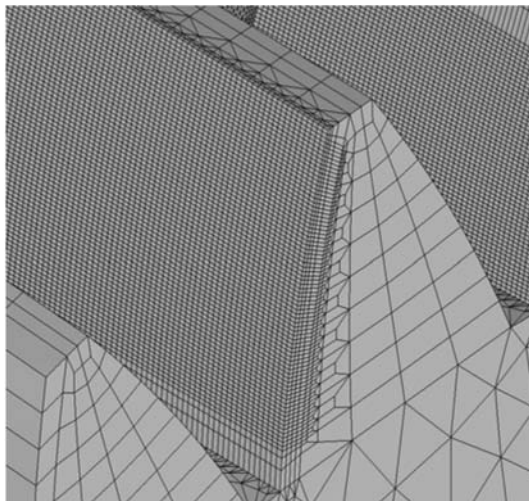


Рис. 6.14. Конечно-элементная сетка на модели зубчатого колеса

После завершения построения КЭ-модели и граничных условий и выбора вида расчетов начинается этап получения решения. Он осуществляется автоматически и требует наибольших затрат машинного времени. Результаты решения записываются в специальный файл и базу данных.

На этапе постпроцессорной обработки результаты решения интерпретируются нужным образом. Имеется возможность обратиться к одному из двух постпроцессоров: постпроцессору общего назначения или постпроцессору истории нагружения.

Постпроцессор общего назначения позволяет отображать результаты любого вида расчета в табличной или графической форме. Табличная форма (листинг) удобна для помещения в отчет. Данные могут быть отсортированы, например, данные о напряжении или данные о перемещениях. Возможна процедура выбора данных и их алгебраическое преобразование. С помощью графического представления данных отображаются на модели области равных значений переменных (например, напряжений). Области равных значений имеют вид изолиний, цветных полос или поверхностей равного уровня (изоповерхностей). Используется и векторное представление данных вдоль заданной кривой в пределах модели.

На рис. 6.15 представлена картина распределения напряжений изгиба в зубьях колеса, видны концентраторы напряжений у оснований зубьев.

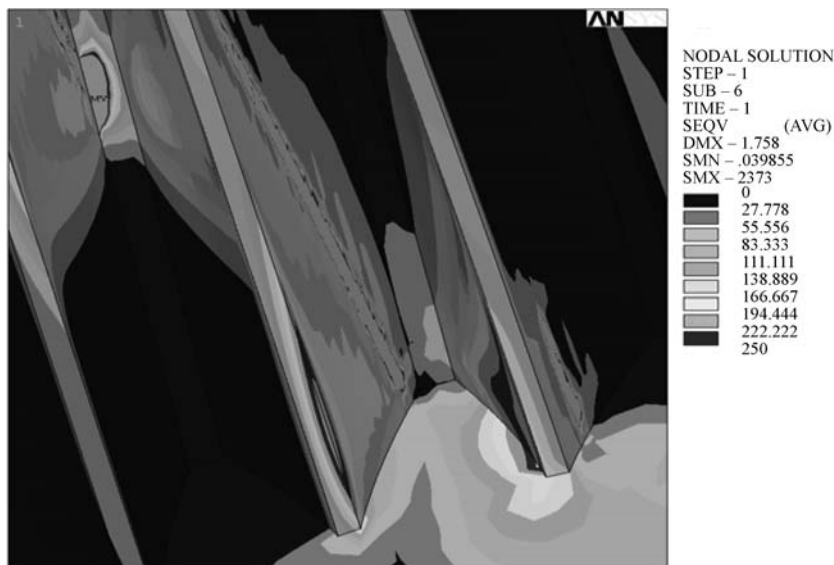


Рис. 6.15. Поля напряжений в зубьях колеса

Поспроцессор истории нагружения дает возможность представить в табличной или графической форме результаты расчета в виде зависимостей от времени или шагов нагружения.

Многоцелевой конечно-элементный расчетный комплекс **LS-DYNA** для проведения динамических расчетов явным методом применяется для расчета высоконелинейных динамических переходных процессов. Программа создана в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса США (Lawrence Livermore National Laboratory). **LS-DYNA** — многоцелевая программа, использующая МКЭ. Программный комплекс предназначен для динамического анализа трехмерных упругих структур. LS-DYNA была задумана как часть оборонной программы США и до сих пор является ею.

Полностью распараллеленный и векторизованный высокоэффективный алгоритм решения нелинейных и быстротекущих процессов, автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения предоставляют проектировщикам во всем мире успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формования.

Уникальный математический аппарат включает более 25 алгоритмов контактного взаимодействия, более 100 уравнений состояния, что позволяет решать задачи:

- нелинейной динамики;
- тепловые;
- разрушения;
- развития трещин;
- контакта;
- квазистатики;
- эйлеровой формулировки МКЭ;
- произвольного лагранж-эйлерова поведения;
- акустики в реальном масштабе времени;
- междисциплинарного анализа: прочность, теплофизика, акустика.

Все приведенные аналитические инструменты позволяют моделировать широкий круг реальных задач:

оценку сопротивляемости удару (краш-тест): автомобили, летательные аппараты, поезда, суда;

анализ динамической прочности автомобильных комплектующих: кузов, бамперы, колесные диски, рулевые колонки и т.д. при движении по неровной поверхности;

оценку безопасности пассажира: взаимодействие воздушной подушки и виртуальной модели человека с моделированием ремней безопасности, прорыв подушки безопасности и др.;

формование металла, стекла, пластиков: прокат, выдавливание, штамповка, волочение, сверхпластическое формование, резка, прокат профилей, литье, глубокая вытяжка, гидроформование (включая большие деформации) и многоступенчатые процессы:

- птицестойкость и задачи об отрыве лопатки турбинных двигателей;
- взаимодействие потоков жидкости и газа с конструкцией;
- взрывная нагрузка на изделия;
- задачи проникания (пробивание броневого пластины, внедрение в грунт пенетраторов и т.п.);
- расчет сварных, заклепочных и болтовых соединений;
- биомедицинские приложения;
- моделирование землетрясений.

Star-CD программный комплекс предназначен для решения задач механики жидкостей и газов в промышленном производстве. Комплекс построен на базе процедур так называемых скользящих сеток. Эффективная параллелизация алгоритма решения, основанного на

применении метода конечных объемов, в сочетании с уникальными методиками автоматизированного разбиения области течения позволяет моделировать задачи любой степени геометрической сложности.

Star-CD является многоцелевым программным комплексом, предоставляющим пользователю следующие возможности для решения задач механики жидкостей и газов.

- стационарные и нестационарные течения;
- ламинарные течения — модель Ньютона и неньютоновские жидкости;
- турбулентные течения (применяется несколько наиболее известных моделей);
- сжимаемые и несжимаемые (включая около- и сверхзвуковые);
- теплоперенос (конвективный, радиационный, теплопроводности с учетом твердых тел);
- массоперенос;
- химические реакции;
- горение газообразного, жидкого и твердого топлива;
- распределенное сопротивление (например, в пористых средах, теплообменниках);
- многокомпонентные течения;
- многофазные потоки — модель Лагранжа (дисперсные газы — твердое тело, газ — жидкость, жидкость — твердое тело, жидкость — жидкость);
- многофазные потоки — модель Эйлера;
- свободные поверхности.

6.5. ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ

Современное машиностроительное предприятие уже не довольствуется автоматизацией отдельных производственных процессов. Проектирование новых изделий, технологическую подготовку производства, управление производством, работу со смежниками, поставщиками комплектующих изделий, заказчиками и другие формы деятельности предприятия стремятся обеспечить интегрированной системой автоматизации (ИСА).

В настоящее время известны пять основных направлений создания ИСА:

1. Разработка ИСА конкретного предприятия по его индивидуальному заказу фирмой — разработчиком программных систем с применением алгоритмических языков высокого уровня.

2. Постепенное развитие систем автоматизации производственной деятельности на предприятии на базе единой интеграционной технологии (например, Сервисно Ориентированной Архитектуры — SOA) путем постепенной интеграции существующих подсистем, покупки новых и разработки под заказ в рамках единой интеграционной среды.

3. Приобретение мощной системы комплексной автоматизации, состоящей из многих функциональных модулей, работающих в единой информационной среде системы и частично адаптированных к особенностям предприятия.

4. Создание ИСА из отдельных систем, подсистем, пакетов, имеющих возможность представления своих выходных данных и знаний в информационной среде предприятия.

5. Ускоренное создание ИСА конкретного предприятия под его индивидуальный заказ с применением инструментальной программной метасистемы (ИПМ) при участии специалистов предприятия.

Реализация перечисленных направлений должна воплощать следующие принципы:

- автоматизация всех этапов жизненного цикла изделия (ЖЦИ);
- интеграция всех систем автоматизации производственной деятельности внутри предприятия;
- интеллектуализация;
- специализация ИСА каждого предприятия;
- индивидуализация рабочего места ИСА предприятия;
- базирование на достижениях современных информационных технологий инжиниринга;
- управление на базе знаний.

Автоматизация всех этапов ЖЦИ от проектирования до утилизации предполагает обработку информационных потоков на основе общей БД.

Интеграция предусматривает единство средств обеспечения автоматизации: методической, информационной, программной, организационной и др.

Интеллектуализация означает использование интеллектуальных моделей при решении всех функциональных задач на всех этапах ЖЦИ.

Специализация ИСА связана с особенностями производственной деятельности предприятия.

Индивидуализация предполагает распределение на каждом рабочем месте знаний между человеком и ЭВМ для решения закрепленных за ним задач.

Интеграция систем автоматизации на базе специализированных пакетов прикладных программ для решения конкретных задач ПДП

может оказаться наиболее экономичным, однако при этом возникают значительные трудности с управлением информационных потоков. Практика показывает, что время на поиск и трансляцию требуемой информации может достигать 80% всего рабочего времени. Это обстоятельство побуждает крупные производства и корпорации ориентироваться на интегрированные CAD/CAM/CAE системы верхнего уровня (тяжелые) с единой системой управления данными проекта (PDM).

Системы CAD/CAM/CAE представляют собой взаимосвязанные инструментальные модули, позволяющие в масштабе предприятия связать всю информацию об изделии на всех этапах его создания: проектирование, подготовка производства, изготовление.

База данных об изделии в электронном архиве обычно включает:

- состав изделия — узлы, детали с указанием их количества;
- использование узлов и деталей в других изделиях;
- комплект документов на изделие с визуализацией его состава.

К числу наиболее известных систем CAD/CAM/CAE относятся: Unigraphics (компания EDS), CATIA (Dessault Systems), Pro/Engineer (PTC), EUCLID (Marta Datavision).

Для примера рассмотрим систему Unigraphics (UG). Родительская компания EDS — крупный поставщик информационных технологий, производит операции более чем в 30 странах (ныне система Simens NX). В России система используется в автомобильной, авиационной промышленности в вагоностроении. Ядром геометрического моделирования служит Parasolid — самый мощный и распространенный пакет трехмерного моделирования. В UG реализовано так называемое «гибридное моделирование», объединяющее геометрическое проектирование с использованием объемов и поверхностей и параметрическое задание геометрии. В простых случаях можно начинать с параметрического моделирования, для сложных конструкций лучше использовать аппарат объемов и поверхностей.

UG обладает набором трансляторов для обмена данными с различными системами, включая межсистемный транслятор в рамках стандарта STEP/PDES.

База данных (Мастер-модель) системы обеспечивает возможность параллельной работы над проектом специалистов разного профиля: конструкторов, технологов, дизайнеров, инженеров-психологов. Мастер-модель дает разработчику уверенность, что он работает с последней редакцией детали или изделия, сколько бы авторов ни вносили в них свои изменения. База данных обеспечивает сквозную ассо-

циативность модели на всех этапах ее реализации, от эскиза до обработки на станке.

Управление проектом реализуется в UG подсистемой IMAN (InfoManager). Это управленческий пакет, отслеживающий движение информации об изделии не только в процессе проектирования, но и в процессе подготовки производства и изготовления.

Система имеет модульную структуру. Помимо базового — как неотъемлемой части системы, насчитывается более 40 достаточно независимых модулей. Число их возрастает по мере развития системы.

Базовый модуль выполняет все обслуживающие операции. Среди них: открытие существующих и создание новых файлов, вывод на печать чертежей, экспорт и импорт графических метафайлов, управление слоями, построение проекций и другие.

Компьютерное проектирование (CAD) поддерживают модули:

- UG/Solid Modeling — объемное гибридное моделирование;
- UG/Features Modeling — моделирование типовыми элементами;
- UG/Freeform Modeling — модели сложных форм;
- UG/User-Defined Features — типовые элементы пользователя;
- UG/Drafting — модуль построения чертежа по исходной модели;
- UG/Assembly Modeling — моделирование сборок;
- UG/Digital Mockup Utilities — утилиты цифрового макетирования, представляющие необходимые инструменты для анализа и документирования больших сложных сборок.

Модули для инженерных расчетов (CAE):

- UG/GFEM PLUS — модуль для конечно-элементного анализа;
- UG/Mechanisms — модуль кинематического анализа;
- UG/MF-Flowcheck — модуль для анализа параметров изготавливаемой пластмассовой детали.

Модули для технологической подготовки производства (CAM):

- UG/CAM Base — базовый технологический модуль, позволяющий строить траекторию режущего инструмента в качестве выхода из всех других модулей подготовки технологии обработки;
- UG/Postprocessor — универсальный постпроцессор, позволяющий строить постпроцессор для станков;
- UG/Lathe — модуль для технологической подготовки обработки деталей типа тел вращения;
- UG/Planar Milling — модуль для технологической подготовки обработки деталей плоским фрезерованием;
- UG/Cavity Milling — модуль для технологической подготовки обработки деталей выборкой полостей;

- UG/Surface Milling — модуль для технологической подготовки обработки деталей многокоординатным фрезерованием;
- UG/Sequential Milling — модуль для контроля каждого шага построения траектории движения инструмента;
- UG/Genius — модуль для инструментальной подготовки производства: планирование и управление инструментальным хозяйством, построение операционных наладок для станков с ЧПУ, распределение заявок на инструмент и оснастку, управление складом оснастки;
- VERICUT — пакет для проверки программ ЧПУ вне станка;
- UG/ Wire EDM — электроэрозионная проволоочная обработка;
- UG/Unisim — моделирование технологической ситуации, визуализирующую полную картину наладки — станок, режущий инструмент, приспособление и заготовку;
- UG/Sheet Metal Design, UG/Sheet Metal Fabrikation, UG/ Sheet Metal Nesting — модули для проектирования, раскроя и вырубki деталей из листового материала.

Помимо перечисленных модулей система Unigraphics обладает языками программирования: макропрограммирование, объединяющее последовательность выполнения команд; графическое программирование для станков с ЧПУ; язык профессионала, обеспечивающий процедурный доступ к базе данных и интерактивным средствам системы.

Системы представляют собой не просто объединенный набор отдельных программных решений, а целостную интегрированную систему взаимосвязанных инструментальных модулей, способных функционировать на различных технических платформах, взаимодействовать с другим производственным оборудованием, обрабатывать данные, полученные путем достижения разработок новейшей технологии.

Системы CAD/CAM/CAE позволяют в масштабе целого предприятия логически связывать всю информацию об изделии, обеспечивать быструю обработку и доступ к ней пользователей, работающих в различных системах. Так же они поддерживают технологию параллельного проектирования и функционирования различных подразделений, согласовано выполняющих в рамках единой компьютерной модели операции проектирования, сборки, тестирование изделия, подготовку производства и поддержку изделия в течение всего его жизненного цикла.

Создаваемая системой модель основывается на интеграции данных и представляет собой полное электронное описание изделия, где присутствует как конструкторская, технологическая, производственная и другие базы данных по изделию. Это обеспечивает значительное улучшение качества, снижение себестоимости и сокращение сроков выпуска изделия на рынок.

Каждая система разрабатывается, руководствуясь задачами объединения и оптимизации труда разработчиков и принимаемых при этом технологий в масштабах всего предприятия для поддержания данной системой стратегии автоматического проектирования.

6.6. CALS-ТЕХНОЛОГИИ

CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support — непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла) или более популярное название этой технологии для гражданских предприятий — Product Lifecycle Management (PLM) — это совокупность технологий информационной поддержки жизненного цикла продукции на всех его стадиях. В России аналогом термина CALS (PLM) принят термин ИПИ — информационная поддержка изделия.

Информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CALS, CAD/CAM/CAE-технологии) вошли в Перечень критических технологий Российской Федерации, утвержденный Президентом РФ В.В. Путиным 30 марта 2002 г. (Пр-578).

Причиной появления CALS (PLM)-технологий — передового направления развития информационных технологий в области промышленного производства стала нарастающая сложность изделий как с точки зрения их создания, так и с точки зрения их дальнейшего сопровождения вплоть до утилизации. Впервые с такого рода сложностями столкнулся Пентагон в связи с программой «звездных войн». Логистическая сложность этой программы потребовала создания единой информационной системы для организации взаимодействия всех фирм, участвующих в ее реализации. В 1987 г. по инициативе свыше 1000 представителей промышленности США был создан Американский Промышленный Комитет в области CALS (US ISG). В дальнейшем подобные организации появились и в Европе, и в Тихоокеанском регионе.

CALS (PLM)-технологии — это технологии комплексной компьютеризации сфер промышленного производства, цель которых — унификация и стандартизация спецификаций промышленной продукции на всех этапах ее жизненного цикла [26]. Под спецификациями подразумеваются документы, представляющие продукцию: проектные, технологические, производственные, маркетинговые, эксплуатационные.

Цель внедрения CALS(PLM) — повышение качества продукции и снижение связанных с ней затрат на всех этапах ее жизненного цикла.

Концептуальная модель CALS представлена на рис. 6.16*.

* Рис. 6.16 заимствован из Internet-документа, представленного НИЦ CALS-технологий.

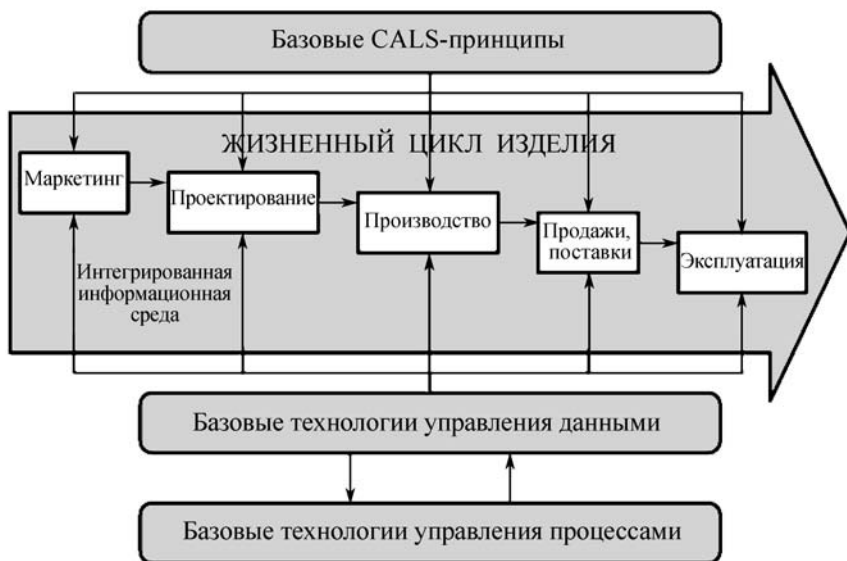


Рис. 6.16. Концептуальная модель CALS

CALS это:

- системная информационная поддержка ЖЦ на основе использования интегрированной информационной среды (ИИС);
- информационная интеграция за счет стандартизации информационного описания объектов управления;
- разделение программ и данных на основе стандартизации структур данных и интерфейсов доступа к ним, ориентация на готовые коммерческие программно-технические решения (Commercial Of The Shelf — COTS), соответствующие требованиям стандартов;
- безбумажное представление информации, использование электронно-цифровой подписи;
- параллельный инжиниринг (Concurrent Engineering);
- непрерывное совершенствование бизнес-процессов (Business Processes Reengineering);
- управление проектами и заданиями (Project Management/Workflow Management);
- управление ресурсами (Manufacturing Resource Planning);
- управление качеством (Quality Management);

- интегрированная логистическая поддержка (Integrated Logistic Support);

- управление данными об изделии, процессах, ресурсах и среде.

ИИС — это совокупность распределенных баз данных, содержащих сведения об изделиях, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных тем субъектам производственно-хозяйственной деятельности, участвующим в осуществлении ЖЦИ, кому это необходимо и разрешено. Все сведения (данные) в ИИС хранятся в виде информационных объектов [38].

Важнейшей стороной ИИС следует считать то, что в ней действуют единые, стандартные правила хранения, обновления, поиска и передачи информации на безбумажной основе.

ИИС организована как модульная система с реализацией следующих базовых принципов:

- прикладные программные средства отделены от данных;
- структуры данных и интерфейс доступа к ним стандартизованы;
- данные об изделии, процессах и ресурсах не дублируются, число ошибок в них минимизируется, обеспечивается полнота и целостность информации;

- прикладные средства работы с данными представляют собой, как правило, типовые коммерческие решения различных производителей, что обеспечивает возможность дальнейшего развития ИИС.

ИИС имеет целью исключить максимально возможное количество бумажных документов. Для этого используется, например, БД об изделии как хранилище информации, требуемой для выпуска конструкторской документации, необходимой на всех стадиях жизненного цикла изделия [Р 50.1.031—2001] и электронные документы. Электронный документ — это структурированный набор данных, состоящий из заголовка, содержательной части и электронно-цифровой подписи (ЭЦП). ЭЦП формируется на основе «систем с открытым ключом». Открытый ключ представляет собой число, вычисляемое по известному алгоритму из индивидуального закрытого ключа в виде индивидуального числа, сохраняемого автором подписи в секрете. Таким образом, ЭЦП есть математическая функция (hash) от содержимого подписываемых данных (data) и секретного ключа (secret_key). Значение математической функции вычисляется по стандартному алгоритму (ГОСТ 34.10—2001). Получатель электронного документа для проверки ЭЦП, представленной открытым ключом, с помощью специальной программы восстанавливает значение hash функции и сравнивает его с hash-функцией от содержимого документа. При совпадении этих значений подпись считается подлинной.

Открытые ключи могут иметь сертификат. Доверенное лицо, выступающее в роли центра сертификации, формирует для каждого открытого ключа автора подписи пакет данных, включающий как сам открытый ключ, так и данные о его владельце. Электронный документ содержит в этом случае ЭЦП центра сертификации. Таким образом, для проверки подлинности подписи необходим открытый ключ или его сертификат. Последний предпочтительней, поскольку содержит не только открытый ключ, но и данные об авторе подписи.

Параллельный инжиниринг (ПИ), как составная часть CALS-технологий, означает одновременное выполнение процессов проектирования, подготовки производства и эксплуатации изделий. Там, где это возможно, сокращается время и расход ресурсов за счет более раннего выявления проблем в ходе разработки. Реализация ПИ возможна путем создания многопрофильных рабочих групп для решения конкретных задач с использованием ИИС.

Непрерывное совершенствование бизнес-процессов в рамках CALS (PLM)-технологий означает последовательное совершенствование процессов проектирования, производства и эксплуатации изделия. Бизнес-процесс — это совокупность последовательно или /и параллельно выполняемых операций преобразования материальных или/и информационных потоков в соответствии с управляющими директивами, выработанными на основе целей деятельности. Разработка и совершенствование бизнес-процессов начинается с анализа существующей ситуации. На этой основе создаются функциональные модели альтернативных процессов с последующим анализом и выбором из них оптимального по критериям затрат и рисков. В настоящее время разработка и анализ бизнес-процессов формализована на основе методологии и нотации SADT, регламентированную под названием IDEFO стандартом США FIPS 183, официально принятую в России.

С этой точки зрения интересны программные комплексы, предназначенные для описания и моделирования бизнес-процессов. Обычно подобные системы базируются на стандарте UML (Unified Modeling Language — унифицированный язык моделирования). Этот стандарт построен на основе объектно-ориентированного подхода.

В качестве реализаций подобного подхода возможно назвать систему ARIS, основанную на разработанной проф. А.Б.Шеером теории «Архитектура интегрированных информационных систем» (Architecture of integrated Information System), и систему IBM WebSphere Business Modeller.

IBM WebSphere Business Modeler обеспечивает возможность наглядного представления, анализа и документирования бизнес-процессов.

В целях непрерывного совершенствования можно моделировать бизнес-процессы, а затем внедрять их и осуществлять мониторинг, принимая те или иные меры на основе ключевых показателей эффективности (KPI Key Performance Indicator). Таким образом, бизнес-процессы тесно связываются со стратегическими целями предприятия и по мере необходимости корректируются.

Эти модели могут быть экспортированы в форматах Business Process Execution Language (BPEL), Web Services Description Language (WSDL) и MQ Workflow Flow Definition Language (FDL) для последующего развертывания бизнес-процессов на основе программных комплексов IBM (IBM WebSphere Business Integration Server, IBM WebSphere MQ Workflow и WebSphere Business Integration Server Foundation) или для автоматизированной подготовки заданий на разработку новых автоматизированных систем.

Управление проектами представляет планирование и организацию действий, направленных на достижение поставленных целей при заданных ограничениях на использование ресурсов. Под ресурсами подразумеваются материальные, финансовые, интеллектуальные или иные ценности, используемые и расходуемые в ходе проектирования, подготовки производства, изготовления, испытания и эксплуатации изделия.

Типовые задачи управления проектами:

- разработка планов выполнения проекта, в том числе разработка структурной декомпозиции работ проекта и сетевых графиков;
- расчет и оптимизация календарных планов с учетом ограничений на ресурсы;
- разработка графиков потребности проекта в ресурсах;
- отслеживание хода выполнения работ и сравнение текущего состояния с исходным планом;
- формирование управленческих решений, связанных с воздействием на процесс или с корректировкой планов;
- формирование различных отчетных документов.

Еще одной задачей, решаемой в рамках CALS-технологий, является управление ресурсами, это: управление финансами, персоналом, запасами, складами, закупками, продажами, ведение портфеля заказов, объемное планирование, расчет потребности в материалах, прогнозирование, оперативное управление производством, управление техническим обслуживанием оборудования, расчет себестоимости продукции и затрат, управление транспортировкой готовой продукции, ее сервисным обслуживанием.

Управление качеством продукции с применением CALS-технологий приобретает новое содержание за счет применения ИИС.

Применение CALS-технологий сокращает затраты на поддержку жизненного цикла изделий за счет ИЛП (интегрированной логистической поддержки).

Внедрение CALS(PLM)-технологий означает своего рода революцию в организации взаимодействия всех, участвующих в обеспечении жизненного цикла продукции. Эта революция требует новых средств инженерного труда, новой нормативной базы. Для использования новых средств инженерного труда необходимо наладить переподготовку специалистов, изменить их подготовку в высших технических учебных заведениях. Новую нормативную базу создают новые стандарты и инструктивно-методические материалы. За рубежом стандарты CALS составляют серию международных стандартов ISO, государственные стандарты военного министерства США, НАТО, Великобритании и некоторых других стран. На разработку стандартов CALS в передовых странах тратятся десятки миллионов долларов. По данным, приведенным в открытой печати, эффективность внедрения CALS-технологий в промышленности США характеризуется сокращением: затрат на проектирование — от 10 до 30%, времени изготовления продукции — от 40 до 60%, времени ввода на рынок — от 25 до 75%, доли брака и объема конструктивных изменений — от 20 до 70%, на подготовку технической документации — до 40%, затрат на разработку эксплуатационной документации — до 30%.

Революционность CALS-технологий отнюдь не означает отказ от существующих стандартов. Нужен эволюционный путь, идя по которому можно было бы использовать весь багаж наработок в рамках ЕСКД и в то же время внедрять современные технологии проектирования и подготовки производства. Еще в 1989 г. вышел ГОСТ 28388–89 «Документы на магнитных носителях данных». Таким образом, электронные документы имеют право на жизнь в ЕСКД.

Концепция внедрения CALS в России разработана в НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика».

Основными направлениями своей деятельности НИЦ CALS-технологии считает:

- совместную работу с Минпромнауки России по формированию и реализации научно-технической политики в области разработки и внедрения CALS в промышленности;
- разработку и продвижение на рынок программно-технических решений в области CALS и компьютерных систем менеджмента качества;

- разработку отечественной нормативной базы по вопросам электронного технического документооборота, электронного описания изделий и процессов;
- выполнение комплексных проектов по внедрению CALS в различных отраслях промышленности;
- оказание консалтинговых услуг по вопросам CALS, комплексного реинжиниринга процессов, компьютерных систем менеджмента качества, подготовки специалистов;
- распространение информации, связанной с проблематикой CALS и менеджмента качества, развитие и обеспечение функционирования Интернет-портала www.cals.ru.

Основой CALS-технологий следует считать международный стандарт ISO 10303, получивший название STEP (Standard for Exchange of Product data). Он определяет средства описания промышленных изделий на всех стадиях их жизненного цикла с использованием специального языка Express.

В нашей стране силами ВНИИстандарт, НИЦ CALS-технологии «Прикладная логистика» и НТЦ «Интегро-Д» разработаны и утверждены первые ГОСТы по CALS-технологии. Так ГОСТ Р ИСО 10303-1-99 содержит общие представления о стандартах серии ГОСТ Р ИСО 10303. Стандарты этой серии устанавливают форму представления информации об изделии вместе с необходимыми механизмами и определениями, которые обеспечивают обмен данными об изделии. Обмен производится между различными вычислительными системами и средами, связанными с полным ЖЦИ, включая его проектирование, производство, эксплуатацию, обслуживание и окончательную утилизацию.

Стандарты серии ГОСТ Р ИСО 10303 делятся на шесть групп, состоящих из отдельных частей. Номер части проставляется в обозначении ГОСТа вслед за обозначением серии стандарта.

Основные группы:

- Методы описания — части 11–19;
- Методы реализации — части 21–29;
- Методология и основы аттестационного тестирования — части 31–39.

Интегрированные ресурсы:

- Обобщенные ресурсы — части 41–99;
- Прикладные ресурсы — части 101–199;
- Прикладные протоколы — части 201–1199;
- Комплекты абстрактных тестов — части 1201–2199.

Основные понятия и их определения в серии ГОСТ Р ИСО 10303. Подчеркнутые в приведенном ниже перечне понятий слова и словосочетания имеют в последующем собственные определения.

Изделие (product): объект или вещество, полученные естественным или искусственным путем.

Информация (information): факты, понятия или инструкции.

Информация об изделии (product information): факты, понятия, или инструкции об изделии.

Информационная модель (information model): формальная модель ограниченного набора фактов, понятий или инструкций, предназначенная для удовлетворения конкретному требованию.

Информационная модель изделия (product information model): информационная модель, которая содержит абстрактное описание фактов, понятий и инструкций об изделии.

Данные (data): представление информации в формальном виде, пригодном для передачи, интерпретации или обработки людьми или компьютерами.

Данные об изделии (product data): представление информации об изделии в формальном виде, пригодном для ее передачи, интерпретации или обработки людьми или компьютерами.

Обмен данными (data exchange): хранение, доступ, передача и архивирование данных.

Язык определения данных (data specification language): набор правил для определения данных и их взаимосвязей, пригодный для компьютерной передачи, интерпретации или обработки.

Структура обмена (exchange structure): машинно-ориентированный формат, используемый для хранения, доступа, передачи и архивирования данных.

Структура ресурсов (resource construct): набор объектов, типов, функций, правил и ссылок на языке EXPRESS, которые вместе составляют достоверное описание данных об изделии.

Структура (structure): набор взаимосвязанных частей какого-либо сложного объекта, а также взаимосвязей между ними.

Интегрированный ресурс (integrated resource): часть настоящей серии стандартов, которая определяет группу структур стандартов, используемых в качестве основы для определения данных об изделии.

Обобщенный ресурс (generic resource): интегрированный ресурс, содержание которого не зависит от контекста.

Приложение (application): группа, состоящая из одного или нескольких процессов, формирующих или использующих данные об изделии.

Прикладной контекст (application context): среда, в которой интерпретируются интегрированные ресурсы для обеспечения использования данных об изделии в конкретном приложении.

Прикладная функциональная модель (ПФМ) (application activity model (AAM)): модель, описывающая приложение в терминах процессов и информационных потоков приложения.

Прикладная интегрированная модель (ПИМ) (application interpreted model (AIM)): информационная модель, в которой используются интегрированные ресурсы, необходимые для удовлетворения информационных потребностей и соблюдения информационных ограничений прикладной эталонной модели в рамках прикладного протокола.

Прикладная эталонная модель (ПЭМ) (application reference model (ARM)): информационная модель, которая описывает информационные требования и ограничения конкретного прикладного контекста.

Прикладной протокол (ПП) (application protocol (AP)): информационная модель, которая определяет прикладную интегрированную модель, удовлетворяющую области применения и информационным требованиям к конкретному приложению.

Интерпретация (interpretation): процесс адаптации структуры ресурсов из интегрированных ресурсов для удовлетворения требованию прикладного протокола. Данный процесс может охватывать: дополнительные ограничения на атрибуты, дополнительные условия, дополнительные взаимосвязи между структурами ресурсов и прикладными структурами или всё вышеперечисленное.

Прикладной объект (application object): элементарный компонент прикладной эталонной модели, который определяет уникальное понятие приложения и содержит атрибуты, определяющие элементы данных объекта.

Прикладной ресурс (application resource): интегрированный ресурс, содержимое которого связано с группой прикладных контекстов.

Сборочная единица (assembly): изделие, которое разлагается на множество комплектующих или других сборочных единиц с точки зрения конкретного приложения предметной области.

Комплектующее (изделие) (component): изделие, которое не разлагается с точки зрения конкретного приложения.

Метод реализации (implementation method): часть настоящей серии стандартов, которая определяет способ, используемый компьютерными системами для обмена данными об изделии, описанными с помощью языка определения данных Express.

Функциональная единица (unit of functionality): набор прикладных объектов и отношений между ними, которые определяют одно или не-

сколько понятий в рамках прикладного контекста таким образом, что отсутствие любого компонента сделает понятия неполными или неоднозначными.

В приведенном перечне представлены понятия и их определения, относящиеся к процессу проектирования.

Интегрированные ресурсы задают базовое представление данных об изделии, инвариантное к предметной области. Базовое представление данных становится основой для построения данных в конкретной предметной области в рамках протокола применения.

Группа стандартов, относящаяся к методам описания, определяет представление информационных моделей интегрированных ресурсов и протоколов с использованием специального языка Express. Этот язык не предназначен для программирования. Его назначение — дать возможность описания информационных моделей понятное как человеку, так и компьютеру.

Передача данных между различными компьютерными системами регламентируется группой стандартов, относящейся к методам реализации.

В настоящее время существует два метода реализации: в формате обменного файла и с помощью программного интерфейса для доступа к базам данных. Наибольшее распространение получил обменный файл, представляющий собой текстовый или двоичный файл особой структуры.

Использование и обменного файла, и программного интерфейса выполняется различными специальными программными средствами представляемых на рынок информационных услуг различными разработчиками. Для установления соответствия программного средства стандарту STEP в него введен специальный раздел в виде группы стандартов: «Методология и основы аттестационного тестирования». Процесс проверки использует комплекты тестов, соответствующих связанным с ними прикладными протоколами.

В стандартах серии ГОСТ Р ИСО 10303 способы представления информации об изделии отделяются от способов реализации, используемых для обмена данными.

Условно процесс проектирования делится на две части: поиск и принятие решений, и описание принятых решений. Первая часть процесса определяется приведенной ранее процедурной моделью, а вот вторая должна быть согласована со стандартами серии ГОСТ Р ИСО 10303.

Составление технического задания, технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, рабочей документации счита-

ют приложениями в понятиях ГОСТ Р ИСО 10303. Более того, к приложениям относятся и процессы описаний результатов выполнения отдельных процедур на стадиях проектирования. Так, например, приложением можно считать процесс составления описания данных об изделии, относящихся к целям его создания.

Для составления описаний необходимо подобрать соответствующий конкретным приложениям прикладной протокол, который определит формальную модель ограниченного набора фактов, понятий или инструкций, используемых в качестве основы для определения данных об изделии применительно к информационным требованиям приложения.

Составление описаний выполняется на языке Express. Прикладной протокол, таким образом, отображает наборы объектов, типов, функций, правил и ссылок на языке Express, удовлетворяющих требованиям приложений, определяет область применения, контекста и информационных требований приложения и не зависит от методов реализации. Под методом реализации понимается отображение описания с языка Express на формальный язык. Сам по себе язык Express не является языком программирования.

6.7. СТРАТЕГИИ РЕАЛИЗАЦИИ PLM СИСТЕМ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Научно-технический прогресс на современном этапе характеризуется возросшей сложностью и наукоемкостью создаваемой продукции, сокращением ее морального срока службы, возрастающими требованиями потребителей. Для успеха на рынке предприятие — производитель продукции стремится сократить время ее разработки. Зачастую для выпуска новой продукции предприятиям приходится объединяться, включая смежников, поставщиков комплектующих изделий. В этих условиях срок реализации во многом зависит от того, насколько тесной оказывается взаимосвязь предприятий. С применением CALS-технологий такая взаимосвязь может быть налажена созданием «виртуального» предприятия. Виртуальное предприятие объединяет ресурсы территориально разобщенных, но заинтересованных в организационном и технологическом сотрудничестве предприятий на основе интегрированной информационной системы.

Построение комплексной автоматизированной системы управления предприятием на базе концепции ЖЦИ может быть реализована следующими способами.

Внедрение комплексной системы автоматизации предприятия от одного производителя. Примерами подобных систем могут служить системы SAP Business Suite и Oracle E-Business Suite. Эти системы являются модульными. С их помощью может быть автоматизировано управление всем предприятием в целом. Кроме этого в их состав входят специализированные модули, обеспечивающие сквозную интеграцию процессов на базе концепции PLM.

Например, в состав SAP Business Suite входит модуль SAP Product Lifecycle Management. Как заявляет компания-производитель решение «Управление жизненным циклом продукта» (SAP PLM) является серьезной основой для успешной разработки и вывода на рынок новых продуктов и изделий, а также объединяет информацию и людей, организуя их эффективную и слаженную работу. Благодаря решению «Управление жизненным циклом продукта» предприятия могут интегрировать в общий процесс различные подразделения, включая отделы маркетинга, продаж, планирования, а также производство, материальное снабжение, техническое обслуживание и ремонт. Кроме того, данное решение обеспечивает возможность совместной работы партнеров, поставщиков, субподрядчиков, поставщиков услуг и даже клиентов.

Решение «Управление жизненным циклом продукта» дает всем вовлеченным сторонам возможность глобального управления бизнес-процессами, касающимися разработки изделий и продуктов и обслуживания оборудования. Оно предоставляет необходимую информацию на протяжении всего жизненного цикла: от разработки концепции изделия, его проектирования и запуска в производство до управления его изменениями, технического обслуживания и поддержки.

Внедрение подобных систем позволяет предприятию применить опыт управления ведущих компаний мира, на опыте которых и разрабатывались подобные продукты. Но это достоинство подхода иногда бывает и его недостатком, потому что иногда зачастую довольно сложно автоматизировать уникальный бизнес-процесс или авторский подход к ведению бизнеса в целом.

Второй подход заключается в создании комплексной информационной системы для конкретного предприятия. В этом случае не важно будет ли это создаваться «с нуля» или из модулей различных программных продуктов, которые автоматизируют отдельные функции и бизнес-процессы предприятия с последующей их интеграцией в единую систему, например на базе сервисо-ориентированного подхода.

Подобный подход позволит создать более гибкую систему, отвечающую требованиям конкретного предприятия. Кроме этого, подход по-

звolyет иметь инновационную составляющую в составе собственной системы управления предприятием, т.е. реализовать собственные принципы ведения бизнеса, которые могут позволить обогнать конкурентов на рынке. При этом инновационные составляющие будут очень трудоемки для копирования. Однако подобный подход во многом более финансово затратный, чем первый, и требует большего времени на внедрение на предприятии комплексной автоматизированной системы.

В нашей стране в последние годы многие предприятия внедряют ИПИ-технологии. К таким предприятиям относятся: ОКБ Сухого, КнААПО им. Ю.А. Гагарина, ТАНКТК им. Г.М. Бериева, Энергомаш-корпорация, ОАО «Раменский приборостроительный завод», АНТК им. А.Н. Туполева, ОАО «Туламашзавод», конструкторское бюро приборостроения (г. Тула), АО «Балтийский завод», УМПО «Уфимские заводы».

Все шире используется электронная документация для сопровождения изделий как в период их создания, так и эксплуатации. Для примера приведем документ, представленный Машиностроительной корпорацией «Сплав» по прибору для слива нефти и нефтепродуктов из железнодорожных цистерн (рис. 6.17).

На российском рынке представлено несколько программных продуктов для создания ИЭТР:

- **Technical Guide Builder** разработки НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»;

- **Adobe Frame Maker 6+SGML** фирмы Adobe.

Technical Guide Builder — это система автоматизированной подготовки интерактивных электронных технических руководств. Ее функциональность обеспечивает работу коллектива авторов, планирование и обмен данными между разработчиками.

Возможности программного продукта:

- использование подготовленных руководств, соответствующих международным стандартам;
- возможность работы над руководством коллектива авторов, включая планирование работ и обмен информацией по сети;
- четкое разделение прав пользователей, контроль доступа к данным;
- централизованное администрирование системы;
- интеграция с PDM-системами и офисными приложениями;
- возможность использования в руководствах помимо текстовых и графических данных аудио/видеороликов и трехмерных моделей.

Охватить Единым информационным пространством все этапы жизненного цикла пока невозможно из-за того, в частности, что ран-



Рис. 6.17. Интерактивный электронный технический документ (ИЭТД)

ние стадии проектирования еще не получили программной поддержки, хотя работы в этом направлении ведутся [13].

Применение CALS (PLM)-технологий становится неременным условием жизнеспособности предприятий. Научно-технический прогресс всегда требовал повышения квалификации специалистов. В настоящее время это связано с освоением CALS (PLM)-технологий. Внедрение CALS-технологий в учебный процесс требует существенного его изменения. В целом он должен стать CALS-ориентированным. Это означает, что все технические дисциплины, относящиеся к тем или иным этапам жизненного цикла изделий в машиностроении (проектирование, изготовление, эксплуатация, ремонт, утилизация), должны представлять информацию в Едином информационном пространстве, что достигается применением стандартов ИСО Р 10303.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автоматизация** поискового конструирования: искусственный интеллект в машинном проектировании / А.И. Половинкин и др.; под ред. А.И. Половинкина. М.: Радио и связь, 1981. 344 с.
2. **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.
3. **Баловнев В.И.** Проектирование дорожно-строительных машин с использованием оборудования САПР. М.: МАДИ, 1980. 87 с.
4. **Бахур А.Б., Панкова Л.А.** Структурная идентификация на основе интегративно-функционального подхода — новые возможности моделирования сложных технических систем // Тр. международной конференции «Идентификация систем и задачи управления», Москва, ИПУ РАН, 26-28.09.2000. С. 160–163.
5. **Бреховских С.М., Прасолов А.П., Солинов В.Ф.** Функциональная компьютерная систематика материалов, машин, изделий и технологий. М.: Машиностроение, 1995. 552 с.
6. **Бусленко В.Н.** Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. 239 с.
7. **Быков В.П.** Методическое обеспечение САПР в машиностроении. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 255 с.
8. **Быков В.П., Быков В.В.** Предпосылки создания гибкого автоматизированного конструкторского бюро // Вестник машиностроения. 1999. № 3. С. 49–51.
9. **Быков В.П., Быков В.В., Орлов О.М.** Автоматизированная разработка технического задания на проектирование объектов машиностроения // Вестник машиностроения. 2000. № 7. С. 62–64.
10. **Быков В.П., Быков В.В.** Экспертная система для поиска вариантов технического решения в машиностроении // Вестник машиностроения. 2002. № 9. С. 66–69.
11. **Быков В.П.** Технические основы создания машин: конспект лекций // Приложение к журналу. Справочник. Инженерный журнал. 2004. № 9.
12. **Быков В.П.** Программно-методический комплекс для поддержки ранних стадий проектирования машин // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 1. С. 27–33.
13. **Быков В.П., Овсянников М.В.** Ранние стадии проектирования в условиях применения CALS-технологий // Вестник машиностроения. 2008. № 10. С. 63–66.
14. **Гаспарский В.** Праксеологический анализ проектно-конструкторских разработок. М.: Мир, 1978. 222 с.
15. **Гайкович А.И.** Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб.: НИЦ «МОРИНМЕХ», 2001. 256 с.
16. **Гмошинский В.Г., Флорент Г.И.** Теоретические основы инженерного прогнозирования. М.: Наука, 1973. 304 с.
17. **ГОСТ Р ИСО 10303-1-99.** Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. М.: Госстандарт РФ, 2000.

18. **Девятков В.В.** Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 352 с.
19. **Джонс Дж.К.** Методы проектирования. М.: Мир, 1986. 322 с.
20. **Диксон Дж.** Проектирование систем: изобретательство, анализ и принятие решений / пер. с англ. М.: Мир, 1968. 440 с.
21. **Дитрих Я.** Проектирование и конструирование: Системный подход / пер. с польск. М.: Мир, 1981. 456 с.
22. **Евгеньев Г.Б.** Системология инженерных знаний: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 376 с.
23. **Зарилов Р.Х.** Машинный поиск вариантов при моделировании творческого процесса. М.: Наука, 1983. 280 с.
24. **Интеллектуальные системы принятия проектных решений** / А.В. Алексеев, А.Н. Борисов, Э.В. Вилюмс и др. Рига: Зинатне, 1997. 260 с.
25. **Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.** ANSIS в руках инженера: практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
26. **Колчин А.Ф., Овсянников М.В., Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В.** Управление жизненным циклом продукции. М.: Анахарсис, 2002. 304 с.
27. **Конструирование машин:** справочно-методическое пособие: в 2 т. / А.Ф. Крайнев, А.П. Гусенков, В.В. Болотин и др.; под ред. академика К.Ф. Фролова. М.: Машиностроение, 1994.
28. **Коршунов А.М., Монтанов В.В.** Теория отражения и эвристическая роль знаков. М.: Московский университет, 1974. 214 с.
29. **Крайнев А.Ф.** Идеология конструирования. М.: Машиностроение-1, 2003. 384 с.
30. **Лисичкин В.А.** Теория и практика прогностики. М.: Наука, 1972. 224 с.
31. **Мальшев Н.Г., Берштейн Л.С., Боженко А.В.** Нечеткие математические модели для экспертных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат, 1991. 136 с.
32. **Михалевич В.С., Волкович В.Л.** Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 286 с.
33. **Напалков А. В., Прагина Л.Л.** Мозг человека и искусственный интеллект. М.: Московский университет, 1985. 120 с.
34. **Норенков И.П.** Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с.
35. **Построение современных систем автоматизированного проектирования** / под ред. К.Д. Жука. Киев: Наумова думка, 1983. 247 с.
36. **Принс М.Д.** Машинная графика и автоматизация проектирования. М.: Сов. радио, 1975. 230 с.
37. **Рот. К.** Конструирование с помощью каталогов / пер. с нем. В.И. Боризенко и др.; под ред. Б.А. Березовского. М.: Машиностроение, 1995. 420 с.
38. **Р 50-1-031—2001.** «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Часть 1. Стадии жизненного цикла продукции», Госстандарт РФ 2001 г.
39. **Соболь И.М., Статников Р.Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
40. **Сольников Р.И.** Информационные технологии в проектировании. МВО РФ, ГУАП, 2000. 360 с.

-
41. **Теория** прогнозирования и принятия решений: учеб. пособие / под ред. С.А. Саркисяна. М.: Выс. школа, 1977. 351 с.
 42. **Фролов К.В.** Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
 43. **Ханзен Ф.** Основы общей методики конструирования / пер. с нем. Л.: Машгиз, 1969. 224 с.
 44. **Хилл П.** Наука и искусство проектирования / пер. с англ. М.: Мир, 1973. 270 с.
 45. **Холл А.** Опыт методологии для системотехники / пер. с англ. —М.: Советское радио, 1975. 448 с.
 46. **Хубка В.** Теория технических систем / пер. с нем. М.: Мир. 1987. 208 с.

Производственное издание

Быков Владимир Владиславович
Быков Владислав Павлович

**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Редактор *Е.М. Нуждина*

Дизайнер *Н.А. Свиридова*

Корректоры *Л.И. Сажина, Л.Е. Сонюшкина*

Инженер по компьютерному макетированию *А.Д. Деева*

Сдано в набор 05.07.2011. Подписано в печать 27.10.2011

Формат 60×88¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Newton.

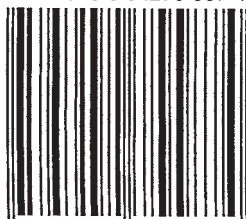
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,68. Уч.-изд. л. 15,64.

Тираж 300 экз. Заказ

ООО «Издательство Машиностроение»,
107076, Москва, Стромьинский пер., 4
www.mashin.ru

Отпечатано в ГУП ППП «Типография «Наука» РАН»
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-94275-587-4



9 785942 755874