

Министерство образования и науки Российской Федерации  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*Д. Е. Бортяков С. В. Мещеряков Н. А. Солодилова*

**ОСНОВЫ  
ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**

*Рекомендовано федеральным учебно-методическим  
объединением в системе высшего образования  
по укрупненным группам специальностей и направлений  
подготовки 15.00.00 «Машиностроение» в качестве  
учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования  
по направлению подготовки бакалавров  
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»*

3-е издание, переработанное и дополненное



Санкт-Петербург

2017

УДК 519.6 (075.8)  
ББК 34.42:34.52  
Б82

**Р е ц е н з е н т ы:**

Доктор технических наук, профессор, академик МАНЭБ, технический директор ООО «Палфингер Кран Рус» *С. Г. Суфтин*

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортные и технологические системы» СПбПУ *К. П. Манжула*

*Бортяков Д. Е. Основы проектной деятельности. Системы автоматизированного проектирования машин и оборудования : учеб. пособие / Д. Е. Бортяков, С. В. Мещеряков, Н. А. Солодилова ; под ред. С. В. Мещерякова. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 152 с.*

Рассмотрены методологические основы проектной деятельности, систем автоматизированного проектирования, моделирования и конструирования, автоматизации разработки конструкторской документации, оптимизации проектных решений при автоматизированном проектировании. Приведены практические примеры автоматизированных методов проектирования и специализированных проектных решений применительно к вакуумной технике, подъемно-транспортному оборудованию, металлоконструкциям, строительно-дорожным и другим машинам.

Пособие соответствует образовательным стандартам высшего образования и предназначено для студентов технических вузов, изучающих дисциплину «Основы проектной деятельности» по направлениям подготовки бакалавров и специалистов в различных областях машиностроения, технологических машин и оборудования, транспортно-технологических комплексов и средств, мехатроники и робототехники, автоматизации технологических процессов и производств, конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств.

Ил. 84. Табл. 18. Библиогр. 23 назв.

Печатается по решению  
Совета по издательской деятельности Ученого совета  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Бортяков Д. Е., Мещеряков С. В.,  
Солодилова Н. А., 2017

© Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, 2017

**ISBN 978-5-7422-5830-8**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Компьютерные и информационные технологии во всем мире быстро развиваются и непрерывно совершенствуются. Вместе с ними модернизируются технические и программные средства систем автоматизированного проектирования (САПР).

Подготовка специалистов в области САПР тоже идет в ногу со временем. Министерством образования и науки РФ утверждены новые федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (ФГОС ВО) и направления подготовки инженеров, бакалавров и магистров. В соответствии с изменениями в ФГОС ВО [22] обновлены учебные планы, названия и рабочие программы дисциплин.

Все это привело к необходимости пересмотреть и обновить существующие учебно-методические материалы. Данное учебное пособие является третьим, переработанным и дополненным вариантом предыдущих изданий «Системы автоматизированного проектирования» (2002 г.) и «Основы автоматизированного проектирования» (2007 г.). Особенность нового материала состоит в том, что оно ориентировано больше на базовое методическое обеспечение процесса проектирования, а не на конкретные технические средства и пакеты программ, которые быстро устаревают и непрерывно обновляются.

Содержание пособия соответствует дисциплине «Основы проектной деятельности» по направлениям подготовки бакалавров 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы» и дисциплине «САПР транспортно-технологических машин» для специалистов по направлению 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

Часть 1 «Основы проектной деятельности» является вводной и подготовлена совместно всеми авторами. В ней приведены общие понятия проектирования как процесса, основные термины и определения, принципы создания САПР, ее структура и взаимодействие с другими системами.

Часть 2 «Моделирование и конструирование в САПР» разработана авторами Солодиловой Н. А. и Мещеряковым С. В. и содержит математические методы САПР, виды геометрического моделирования и параметризации.

Часть 3 «Оптимизация проектных решений при автоматизированном проектировании» написана авторами Бортяковым Д. Е. и Мещеряковым С. В. и включает методы оптимизации и критерии качества проектных решений.

В каждой части даны практические примеры из различных областей техники, а в конце вопросы для самоконтроля. Общая редакция и компоновка выполнены профессором Мещеряковым С. В. Оформление макета соответствует правилам и стандартам по информационному и издательскому делу [8].

# 1 Основы проектной деятельности

## 1.1 Введение в автоматизированное проектирование

### 1.1.1 Понятие проектирования как процесса

Прогресс науки и техники, потребности в новых промышленных изделиях обуславливают необходимость выполнения проектных работ большого объема. Проектирование машин и систем машин является многоэтапным динамическим процессом. Это процесс творческий, многоплановый и достаточно трудоемкий. Как правило, проектирование машин осуществляется большим коллективом различных специалистов с использованием многочисленных расчетных, экспериментальных, эвристических методов и приемов.

Современная практика проектирования машин и систем машин свидетельствует, что для достижения успеха инженер должен одинаково хорошо ориентироваться в шести областях:

- в самом объекте, процессе, системе проектирования;
- в аппарате обработки и анализа входной и выходной информации об объекте, процессе, системе и внешней среде;
- в математическом моделировании, которое заключается в умении перевести техническое задание с проблемно-содержательного языка на математические схемы и модели и далее в специальное программное обеспечение (ПО);
- в методах поиска оптимального решения;
- в соответствующем программном обеспечении САПР (интерактивных системах, банках данных, базах знаний и др.);
- в свободном владении средствами вычислительной техники.

Требования, предъявляемые к качеству проектов, срокам их выполнения, оказываются все более жесткими по мере увеличения сложности проектируемых объектов и повышения важности выполняемых ими функций. Удовлетворить эти требования с помощью простого возрастания численности проектировщиков нельзя, так как возможность параллельного проведения проектных работ ограничена, и численность инженерно-технических работников в проектных организациях не может быть заметно увеличена. Решить проблему можно на основе автоматизации и широкого применения вычислительной техники.

Цель автоматизации проектирования — повышение качества, снижение материальных затрат, сокращение сроков проектирования и ликвидация тенденции роста числа инженерно-технических работников, занятых проектированием, повышение производительности их труда. Однако не всегда переход от традиционных неавтоматизированных методов проектирования к автоматизированным обеспечивает достижение указанной цели. Например, часто удается ускорить процесс проектирования без улучшения качества изделий, в отдельных случаях не наблюдается непосредственного снижения материальных затрат. Тем не менее, важен эффект ускорения научно-технического прогресса в данной области техники.

Применение компьютеров для решения отдельных проектных задач началось одновременно с их появлением. Однако оно было скорее эпизодическим, чем систематическим. Обычно в каждом конкретном случае инженер заново составлял программу решения, используя традиционные методы проектирования. Поскольку эти методы разрабатывались для неавтоматизированного проектирования, их копирование при автоматизированном проектировании не могло дать ожидаемого эффекта.

Необходим обоснованный выбор методов машинного решения задач, подразумевающий правильный учет возможностей вычислительной математики и вычислительной техники для обеспечения приемлемого компромисса между требованиями высокой точности, степени универсальности, малых затрат машинного времени, памяти и труда инженеров-проектировщиков на сбор исходной информации.

Для автоматизированного проектирования характерно систематическое использование компьютера при рациональном распределении функций между ним и человеком. На компьютерах решаются задачи, поддающиеся формализации, при условии, что их машинное решение более эффективно, чем ручное. К таким задачам относится выполнение многих процедур оформления технической документации, получения планов размещения оборудования, решения систем уравнений, описывающих процессы в проектируемых объектах, и т. д. Как правило, на компьютере не только решаются, но и автоматически составляются системы уравнений на основе лаконичного исходного описания объекта и имеющихся в памяти компьютера сведений.

Программы разрабатываются единожды, а применяются многократно в различных ситуациях, возникающих при проектировании многих объектов. Именно поэтому инженеру-пользователю необходимо знать методы и алгоритмы, реализованные в программах САПР, что поможет избежать ошибок в формулировке задач, выборе исходных данных, интерпретации результатов и получить их с наименьшими затратами общего и машинного времени.

Граница между автоматизированным и неавтоматизированным проектированием не может быть четкой. Она зависит от конкретных условий и должна изменяться по мере развития математики, вычислительной техники и теории проектирования. То, что сегодня представляется наилучшим распределением функций между человеком и компьютером и оптимальным методом решения, завтра может перестать быть таковым в связи с расширением знаний и технических возможностей.

Универсальность многих положений автоматизации проектирования имеет ту же природу, что и общность приемов математического исследования различных физических объектов и явлений. Развитие автоматизации проектирования выражается, прежде всего, в совершенствовании и углублении именно математических приемов исследования, поэтому появление и развитие автоматизированного проектирования стимулирует создание общей теории инженерного проектирования.

В большинстве промышленно развитых стран литература о методах проектирования начинает появляться в 50–60-х годах XIX века. До этого времени было достаточно знать, что проектированием занимаются архитекторы, инженеры, художники, дизайнеры и другие, когда создают чертежи для своих клиентов и для целей производства. Теперь положение изменилось. Имеется много профессиональных проектировщиков, подвергающих сомнению методы, которым их обучили, и появилось множество новых приемов, призванных сменить традиционные процедуры.

Чтобы найти более надежную основу для рассуждений, попытаемся дать определение проектирования, исходя не из течения самого процесса, а из его результатов. Для этого достаточно рассмотреть конец той цепочки событий, которая начинается с пожеланий заказчика, включает в себя проектирование, производство, сбыт, потребление и заканчивается влиянием спроектированного объекта на мир в целом. Можно утверждать с уверенностью, что общество стало иным, чем оно было до появления данного объекта. Если проект удачный, он вызвал именно такие изменения, на которые рассчитывал заказчик. Если проект оказался неудачным (что, вообще говоря, случается чаще), его конечное влияние может быть весьма далеким от расчетов заказчика и прогнозов проектировщика, но и в этом случае он вызовет *изменение* того или иного характера.

Следовательно, в любом случае мы можем заключить, что цель проектирования — *положить начало изменениям в окружающей человека искусственной среде*. Эту простую, но универсальную формулировку можно принять в качестве рабочего определения того расширяющегося процесса, который когда-то протекал за чертежной доской, а сегодня включает в себя научные исследования и опытно-конструкторские работы, снабжение, разработку технологий, подготовку производства, сбыт, системное проектирование и многое другое. Данное определение охватывает деятельность не только профессиональных конструкторов, архитекторов, проектировщиков, но также плановиков, экономистов, законодателей, администраторов, публицистов, ученых, всех тех, кто стремится осуществить изменения в форме и содержании изделий и окружающей среды.

### **1.1.2 Задачи проектировщика**

Цель проектировщика традиционного типа заключалась в том, чтобы разработать чертежи, которые могли бы получить одобрение клиента и дать необходимые указания изготовителю. Из нашего определения проектирования как *процесса, который вызывает изменения в искусственной среде*, следует, что должны существовать какие-то другие цели, достижимые до окончания и даже до начала разработки чертежей. Проектирование оказывается все меньше направленным на сам разрабатываемый объект и все больше на те изменения, которые должны претерпеть производство, сбыт, потребитель и общество в целом в ходе освоения и использования нового объекта.

Такой взгляд на проектирование как на длинную цепь взаимосвязанных предположений и уточнений иллюстрируется на рисунке 1.1. Процесс внесения изменений в искусственную среду представляется как ряд событий, который начинается с поступления материалов и комплектующих изделий на завод-изготовитель и заканчивается эволюционными изменениями в обществе под воздействием системы, в которую входит новое изделие. Каждое из этих событий представляет собой особый этап в существовании изделия и зависит от предшествующего события. Ни заказчики, ни проектировщики не могут непосредственно влиять на всю последующую историю изделия, оно выходит из-под их контроля сразу после поступления в производство.

Заказчик дает проектировщику техническое задание на новый объект и его будущее состояние в окружающей среде. Для руководителя завода это может быть участие в рынках сбыта (блок «требования к сбыту» на рисунке 1.1). Если требуются помещения для размещения нового объекта, в задании будут указаны их размеры и расположение (блок «операторы систем»).

Нижний ряд блоков на рисунке 1.1 показывает, что в соответствии с полученным заданием проектировщик должен подготовить свои предложения, так чтобы предсказать свойства объекта и реакцию на них на каждом этапе его существования. Для этого необходимо провести экстраполяцию на имеющихся моделях известных характеристик аналогичных изделий в прошлом и спрогнозировать поведение объекта в будущем, в новой среде. При этом проектировщик должен получить ответ на вопросы, указанные в таблице 1.1.

### 1.1.3 Трудности проектирования

Обратимся теперь к различным организациям, куда в период своего существования попадает новое изделие, и рассмотрим межпрофессиональные и межличностные препятствия, возникающие при необходимости проведения проектных работ одновременно на уровне систем и на уровне изделий.

**Заказчики.** В основе всех затруднений лежит тот факт, что заказчики, финансирующие разработку новых систем, чаще всего имеют слишком узко направленную материальную заинтересованность и обладают недостаточным влиянием на других операторов систем, с которыми им приходится сотрудничать. Чаще всего бригада проектировщиков получает краткое техническое задание, отражающее интересы заказчиков на данный момент. В ответ проектировщики могут выдвинуть встречные предложения, которые, как они справедливо считают, позволят существенно, а не только поверхностно повысить эксплуатационные характеристики системы.

Если в этих встречных предложениях будут обрисованы принципиально новые виды изделий, необходимые для осуществления этих предложений, то заказчики едва ли распознают в проекте важный элемент их собственного будущего. Такой холодный прием еще более вероятен, если возросшие размеры системы потребуют в будущем дополнительного финансирования.

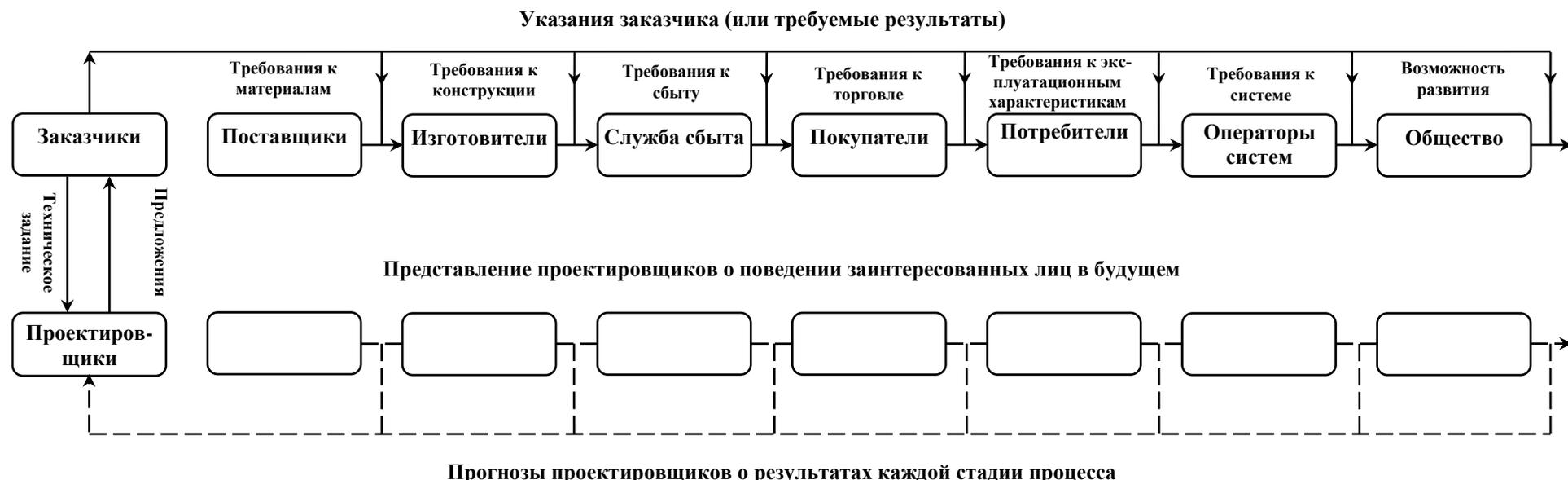


Рисунок 1.1 — Схема проектирования как процесса внедрения в окружающую среду

Таблица 1.1 — Вопросы, на которые должна ответить проектная группа

<b>Вопросы относительно проектируемого объекта</b>	<b>Кто дает на них ответ</b>
Понравится ли проект заказчику? В интересах ли заказчика вложить капитал в этот проект? Будет ли проект принят к осуществлению?	Заказчик и финансирующие организации
Оптимальным ли образом в проекте используются доступные материалы и комплектующие?	Поставщики
Можно ли достаточно экономично реализовать проект в рамках имеющихся ресурсов?	Изготовители
Можно ли распространить проект по существующим каналам?	Работники сбыта
Каковы требования к внешнему виду, эксплуатационным характеристикам, надежности и пр.?	Потребители и торгующие организации
В какой мере проект будет согласован с другими изделиями или конкурировать с ними?	Другие заказчики
В какой мере он изменит существующую ситуацию, создаст ли новые потребности, новые возможности и новые трудности?	Операторы больших систем
В какой мере его прямые и побочные эффекты приемлемы для всех, кого они касаются?	Госучреждения и общественные группы

**Бригада проектировщиков.** Если бригада проектировщиков представляет собой работоспособную группу людей, объединенных общими интересами своего предприятия, то ее членам могут оказаться по плечу самые глубокие преобразования, какие только можно осуществить в пределах данной организации.

Если же для решения задачи необходимо изменить границы организации, группе придется учитывать новые интересы и включить представителей новых специальностей, которые до сих пор в ней не работали и не имели времени ознакомиться с позицией и способностями каждого члена группы. Некоторые из них по своему опыту и знаниям будут слишком тесно связаны с теми компонентами существующей системы, которые сдерживают прогресс, и может оказаться, что ни один из них не обнаружит достаточного понимания и опыта для того, чтобы быстро оценить возможности реализации всех или некоторых новых элементов, необходимых для совершенствования системы.

Кроме того, проектировщики будут часто не учитывать тот факт, что элементы существующей системы, которые войдут в новую систему, будут работать в ней в изменившихся условиях, так что на сохранение их показателей и их надежность уже нельзя полагаться без новых, тщательно проведенных испытаний. Так, например, раньше при разработке грузоподъемных кранов несущая металлоконструкция проектировалась без учета установки на ней аппаратуры управления, приборов безопасности, из-за чего возникали существенные сложности между инженерами-электриками и инженерами-механиками.

**Поставщики.** Поставщики материалов и комплектующих изделий легко могут переоценить имеющиеся у них возможности удовлетворить требования, предъявляемые к радикально новым изделиям, и не заметить многочисленных препятствий, которые им придется преодолеть при детальном приспособлении своего производства к требованиям новой конструкции. Однако им зачастую может быть безразлична *форма* существующего изделия, их может интересовать лишь *объем и регулярность* заказов, которые они рассчитывают получить.

Поэтому контакты с потенциальными поставщиками на ранних этапах разработки крупного проекта могут помочь преодолеть многие факторы, оказывающие сопротивление всякому изменению существующего положения.

**Изготовители.** Основная трудность здесь не в том, что изготовители (инженеры-технологи) противятся изменениям, а в том, что им не удастся точно прогнозировать стоимость предлагаемых изменений в проекте до того, как будет разработана подробная технология, т. е. когда такие прогнозы в значительной мере уже потеряют свою ценность для бригады проектировщиков. Дело в том, что уже весьма незначительные изменения конструкции могут сильно повлиять на издержки производства изделия. Таким образом, одним из следствий реорганизации системы является лишение проектировщиков точных стоимостных оценок, без которых не может быть уверенности в целесообразности предлагаемых крупных изменений.

**Работники сбыта.** Каналы сбыта, наверное, самый стабильный элемент во всей этой картине. Их создание и изменение требуют наибольших затрат, поскольку они строятся на трудно приобретаемом опыте и доверии тех людей, которым удалось согласовать существующую продукцию с широко варьирующимися взглядами оптовиков, работников рекламы, агентов по распространению и розничных торговцев, каждый из которых по-своему понимает интересы потребителя.

Работники сбыта не всегда материально заинтересованы в сохранении существующей конструкции изделия, нередко выражают свое недовольство фирмой, которая не поспевает за происходящими, по их мнению, изменениями спроса. Им, однако, свойствен тот недостаток, что они неизбежно смотрят на потенциальный спрос глазами покупателя, с которым они встречаются, а такой взгляд по самой своей природе направлен лишь на небольшие отклонения от существующего, поскольку у покупателя никакого иного опыта нет. Таким образом, проекты радикального улучшения технических характеристик изделия встретят поддержку работников сбыта лишь в той мере, в какой потребитель уже начал требовать такие изменения.

**Покупатели.** Иногда покупатель и потребитель соединены в одном лице, иногда же это разные люди. В любом случае их, однако, надо рассматривать по отдельности из-за очевидного различия между реакцией человека на изделие, которое он никогда ранее не видел, и его же реакцией на него после того, как он приобрел опыт пользования этим изделием и приспособился к нему. Больше всего препятствуют переменам, во-первых, неумение покупателя заранее определить свою или чужую способность приспособиться к новому изделию и, во-вторых, выставочный эффект, благодаря которому новое изделие обладает или не обладает непосредственной силой воздействия на покупателя, позволяющей ему преодолеть его природную нерешительность. Здесь снова конечный результат будет не в пользу радикально новой конструкции, потому что заявления об ее эксплуатационных преимуществах покупателю приходится принимать на веру и потому что потенциальный покупатель обычно стремится приобрести такое новое изделие, которое придавало бы ему самому желательные для него черты в глазах окружающих.

**Потребители.** Потребитель очень чувствителен к небольшим, но имеющим значение различиям в стиле, цвете или рисунке, но может быть совершенно равнодушен к подлинно новым формам, которые не приобрели еще широкого признания или социальной значимости. Эта особенность отношений — сильный аргумент *против* того, чтобы базировать новые конструкции на результатах опросов потребителей и выявлении их предпочтений. Потребители очень медленно приспосабливаются к изменениям в конструкции изделий и не могут заранее определить свою реакцию на них.

**Операторы систем.** Здесь речь идет о том, что при проектировании системы неизбежно разбиение ее на ряд подсистем, в каждой из которых руководитель (как правило, менеджер) выступает в роли оператора.

Когда речь идет об исключительном случае создания принципиально новой системы, ответственность за которую еще никто на себя не взял, интересы и взгляды операторов существующих систем лишь частично будут отражать преимущества и недостатки разрабатываемой системы.

**Общество.** На дальнем конце цепи событий, из которых складывается история создания и существования изделия, лежит та единственная сфера, в которой отражаются все радикальные изменения, внесенные при разработке новой или реорганизации старой системы. Политические действия и общественный протест — зачастую единственные каналы, через которые удается оказывать влияние на основные аспекты социально-технических изменений.

Главная трудность заключается в том, что проектировщик должен на основании современных данных прогнозировать некоторое будущее состояние, которое возникнет только в том случае, если его прогнозы верны. Предположения о конечном результате проектирования приходится делать еще до того, как исследованы средства для его достижения. Проектировщик вынужден проследивать события в обратном порядке, от следствий к причинам, от ожидаемого влияния данной разработки на мир к началу той цепочки событий, в результате которой и возникнет это влияние.

#### 1.1.4 Проектирование: искусство или наука

Проектирование не следует путать ни с искусством, ни с естественными науками, ни с математикой. Это сложный вид деятельности, где успех зависит от правильного сочетания всех этих трех средств познания, и очень низкая вероятность добиться успеха путем отождествления проектирования с одним из них. Основное различие связано с *временными отношениями*. Деятели искусства и науки имеют дело с физическим миром (реальным или символическим) в том виде, в каком он существует в *настоящее время*, а математики оперируют абстрактными отношениями, *не зависящими от календарного времени*.

Проектировщики всегда вынуждены считать реальным то, что существует лишь в воображаемом *будущем*, и искать пути претворения в жизнь *предполагаемых* объектов. Прежде чем предсказывать будущее, разработчик должен в достаточной мере знать настоящее, а для этого он должен обладать свойствами ученого — скептицизмом, умением поставить эксперимент и проанализировать его результаты. Однако когда разработчик переходит от настоящего к будущему, позиция сомневающегося ученого становится для него бесполезной, и ей на смену должно прийти нечто другое, похожее на подсознательную веру.

Подход художника необходим разработчику на том этапе, когда в лабиринте альтернатив приходится отыскивать тропинку, ведущую к новому и непротиворечивому построению, которое могло бы стать основой решения. При этом нужно иметь какой-нибудь податливый материал или аналог, который позволял бы, поспевая за течением мысли, передавать *форму* решения. Обычно

таким материалом служили эскизы, быстро набрасываемые на обороте конверта, за которыми стояли точные образы вариантов проекта в воображении.

Метод математика, выражающего исходные предположения через абстрактные символы, а затем манипулирующего этими символами до принятия решения, годится для проектировщика лишь на том этапе, когда *задача стабилизировалась*, когда для того, чтобы разрешить противоречия между целью и средствами, уже не требуется изменять исходные посылки.

Однако самая интересная и самая сложная часть разработки — это как раз поиск решения путем изменения формулировки задачи, поэтому правильно будет считать, что математика полезна только для оптимизации, т. е. для отыскания наилучшего решения после того, как задача уже определилась. *Если задачу проектирования можно сформулировать в математических символах, ее решение может быть получено на компьютерной технике без непосредственного участия человека в расчетах.*

## **1.2 САПР в машиностроении**

### **1.2.1 Основные понятия и определения**

#### ***Проектирование как объект автоматизации***

Для создания любой системы автоматизации необходимо знать свойства *объекта автоматизации*. Для САПР таким объектом является процесс проектирования. Основные термины и определения в области автоматизированного проектирования регламентированы ГОСТ 34.003–90 [7].

***Проектирование*** — процесс создания описаний нового или модернизируемого технического объекта (изделия), достаточных для изготовления или реализации этого объекта в заданных условиях.

Такие описания, называемые окончательными, представляют собой комплект конструкторской и технологической документации в виде чертежей, пояснительных записок, спецификаций, программ для технологических автоматов и т. п. Процесс заключается в выполнении комплекса работ исследовательского, расчетного, конструкторского характера, имеющих целью преобразование исходного описания в окончательные описания. Исходное описание при этом есть техническое задание, отражающее назначение и основные требования к проектируемому объекту.

Процесс проектирования может быть неавтоматизированным и автоматизированным.

***Неавтоматизированное проектирование*** — это проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представления описаний на различных языках осуществляются человеком.

***Автоматизированное проектирование*** — это проектирование, при котором все или отдельные преобразования описаний объекта и (или) алгоритма

его функционирования или алгоритма процесса, а также представления описаний на различных языках осуществляются при взаимодействии человека и компьютера.

Степень автоматизации проектирования оценивается долей  $\delta$  проектных работ, выполняемых на компьютере без участия человека, в общем объеме проектных работ. При  $\delta=0$  проектирование неавтоматизированное, а при  $\delta=1$  — полностью автоматическое. При автоматизированном проектировании должно быть рациональное распределение функций между человеком и компьютером и обоснованный выбор моделей и методов для автоматизированных процедур. Рациональность и обоснованность в выборе средств и методов проектирования определяются уровнем развития вычислительной техники, вычислительной математики, теории автоматизированного проектирования и конкретных технических дисциплин.

Под автоматизацией проектирования будем понимать широкий круг проблем, решаемых с использованием средств вычислительной техники при выполнении многочисленных этапов и процессов проектирования объекта (машины, комплекса машин, системы и др.).

### ***Аспекты и иерархические уровни проектирования***

В представлениях инженера о сложных технических объектах принято выделять аспекты и иерархические уровни. Аспекты характеризуют ту или иную группу родственных свойств объекта. Типичные аспекты — функциональный, конструкторский, технологический.

Функциональный аспект отражает физические и информационные процессы, протекающие в объекте при его функционировании; конструкторский — структуру, расположение в пространстве и форму составных частей объекта; технологический — возможности и способы реализации или изготовления. В зависимости от разновидностей объектов могут быть и другие аспекты, например при проектировании электромеханических систем — электрический (электронный) и механический.

В соответствии с указанными аспектами различают функциональное, конструкторское, технологическое проектирование.

Практика показывает, что подавляющее большинство сложных технических объектов имеет иерархическую структуру. Выделение иерархических уровней при описании проектируемого объекта, когда на каждом следующем уровне описание свойств объекта становится все более подробным, составляет сущность *блочного-иерархического* подхода к проектированию.

Процесс разделения описания сложного технического объекта на более простые называется *декомпозицией*. Декомпозиция позволяет решать сложную задачу как совокупность более простых задач проектирования и исследования отдельных частей технического устройства. Многие из этих задач могут быть решены параллельно различными коллективами проектировщиков, что значи-

тельно сокращает сроки создания новых изделий. Процесс декомпозиции заканчивается тогда, когда на очередном уровне иерархии оказываются неделимые (базовые) элементы.

На рисунке 1.2 показана иерархическая структура объекта проектирования на примере объектов машиностроения.

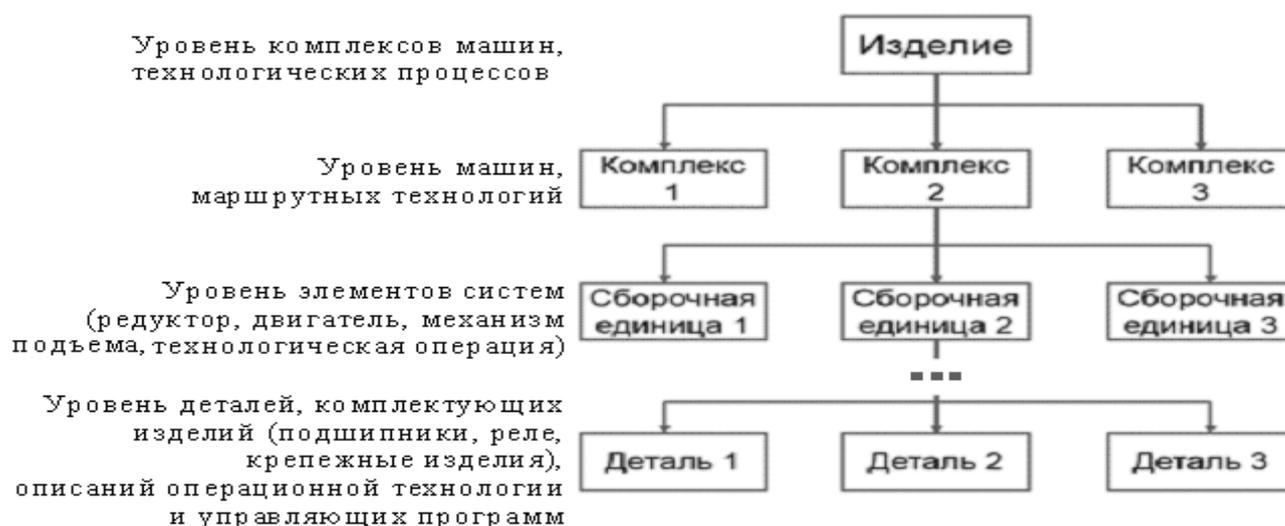


Рисунок 1.2 — Иерархическая структура объекта проектирования

На верхнем иерархическом уровне рассматривается технический объект в целом. Это может быть отдельная машина или комплекс машин, объединенных, например, в технологическую линию. На следующем иерархическом уровне выделяются крупные узлы технического объекта, такие как двигатель, редуктор, подъемный механизм, загрузочное устройство, которые, в свою очередь, состоят из отдельных частей. Деление на уровни иерархии продолжается до тех пор, пока не будут получены базовые объекты. В машиностроении базовыми объектами считают, например, крепежные изделия, подшипники, отдельные детали.

Если рассматривать технологию машиностроения, то здесь неделимыми блоками (базовыми элементами) будут являться технологический и вспомогательный переходы. На более высоком уровне располагаются технологические и вспомогательные операции, а вслед за ними маршрутные технологии и технологические процессы.

### ***Стадии, этапы и процедуры проектирования***

В проектировании принято выделять стадии научно-исследовательских работ, опытно-конструкторских работ, технического проекта (технического предложения), рабочего проекта, испытаний опытного образца.

Стадия **научно-исследовательских работ (НИР)** включает изучение потребности в получении новых изделий с заданным целевым назначением; исследование физических, информационных, конструктивных и технологических

принципов построения изделий и возможность их реализации; прогнозирование значений характеристик и параметров объектов.

Результатом НИР является формулировка **технического задания (ТЗ)** на разработку объекта. ТЗ включает цель создания и назначение объекта, технические требования, режимы и условия работы, области применения, увязку параметров с типажом, информацию об экспериментальных работах, сравнительную оценку технического уровня и др.

На основании ТЗ разрабатывается **техническое предложение (ТП)** — это совокупность документов, отражающих технические решения, принятые в проекте. В него включаются результаты функционального, физического и стоимостного исследований, указания и обоснования по выполняемым функциям, физическим принципам действия, целесообразности использования тех или иных решений, сравнительная оценка этих решений по техническим, экономическим, технологическим, экологическим и другим показателям.

На стадии **опытно-конструкторских работ (ОКР)** создается эскизный проект изделия, представляющий собой совокупность графической и текстовой документации, на основании которой можно получить общее представление об устройстве, принципе работы, назначении, основных параметрах и габаритных размерах проектируемого изделия, о компоновке как машины в целом, так и ее основных узлов. При разработке эскизного проекта проверяются, конкретизируются и корректируются принципы и положения, установленные на стадии научно-исследовательских работ.

На стадии **технического проекта** разрабатывается более детализированная графическая и текстовая документация, дающая полное и окончательное представление об устройстве, компоновке машины и всех ее узлов. В техническом проекте включены все необходимые расчеты (динамические, прочностные, экономические, экологические и др.).

На стадии **рабочего проекта** создается полный комплект конструкторско-технологической документации, достаточный для изготовления объекта.

На стадии **испытаний опытного образца** получают результаты, позволяющие выявить возможные ошибки и недоработки проекта, принимаются меры по их устранению.

В ходе проектирования вырабатываются **проектные решения** — описания объекта или его составной части, достаточные для рассмотрения и принятия заключения об окончании проектирования или путях его продолжения.

Часть проектирования, заканчивающаяся получением проектного решения, называется **проектной процедурой**. Выполнение одной или нескольких проектных процедур, объединенных по признаку принадлежности получаемых проектных решений к одному иерархическому уровню и (или) аспекту описаний, составляет **этап проектирования**.

На любом этапе проектирования может быть выявлена ошибочность или неоптимальность ранее принятых решений и, следовательно, необходимость или целесообразность их пересмотра. Подобные возвраты типичны для проек-

тирования и обуславливают его *итерационный характер*. В частности, может быть выявлена необходимость корректировки ТЗ. В этом случае чередуются процедуры *внешнего* и *внутреннего* проектирования. Под внешним проектированием понимаются процедуры формирования или корректировки технического задания, под внутренним проектированием — процедуры реализации сформированного ТЗ.

Различают *нисходящее* (сверху вниз) и *восходящее* (снизу вверх) проектирование. При нисходящем проектировании сначала решаются задачи высоких иерархических уровней, а затем задачи более низких иерархических уровней, а при восходящем проектировании последовательность противоположная. Так, функциональное проектирование чаще является нисходящим, а конструирование технического объекта — восходящим.

На рисунке 1.3 представлена типовая последовательность проектных процедур на одном из этапов нисходящего проектирования технического объекта, а на рисунке 1.4 — обобщенная схема алгоритма автоматизации проектирования как процесса.



Рисунок 1.3 — Типовая последовательность проектных процедур при нисходящем проектировании

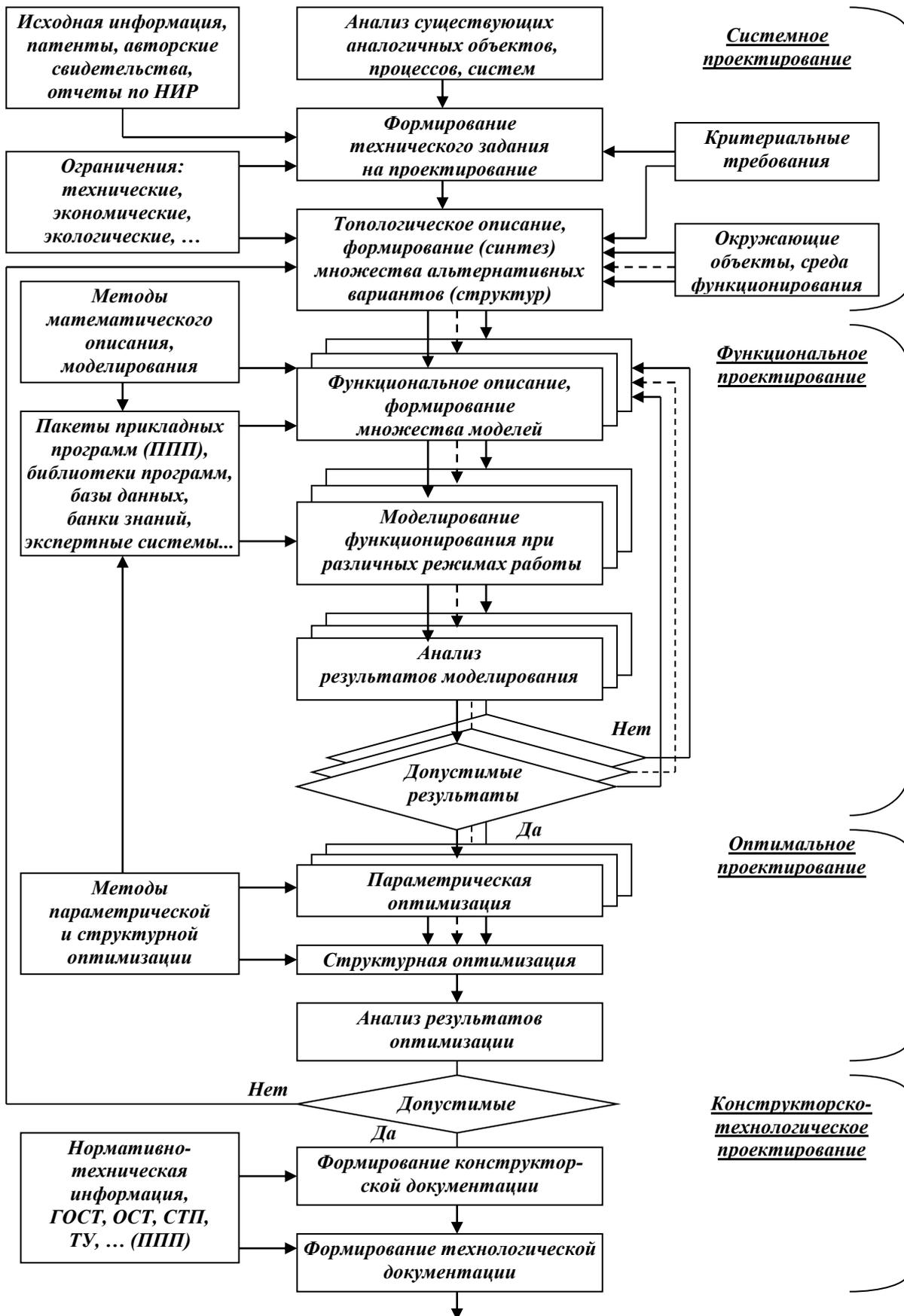


Рисунок 1.4 — Обобщенная схема процесса автоматизации проектирования

## 1.2.2 Принципы создания САПР

В ГОСТ 23501.101–87 [5] регламентированы организационные основы САПР. Для создания САПР необходимы условия:

- 1) совершенствование проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники;
- 2) автоматизация процесса поиска, обработки и выдачи информации;
- 3) использование методов оптимизации и многовариантного проектирования;
- 4) применение эффективных математических моделей проектируемых объектов, комплектующих изделий и материалов;
- 5) создание банков и баз данных (БД), содержащих систематизированные сведения справочного характера, необходимые для автоматизированного проектирования объектов;
- 6) повышение качества оформления проектной документации;
- 7) увеличение творческой доли труда проектировщиков за счет автоматизации нетворческих работ;
- 8) унификация и стандартизация методов проектирования;
- 9) подготовка и переподготовка специалистов в области САПР;
- 10) взаимодействие проектных подразделений с автоматизированными системами различного уровня и назначения.

При создании САПР и их составных частей следует руководствоваться принципами системного единства, совместимости, типизации, развития [5].

*Принцип системного единства* обеспечивает целостность системы и системную «свежесть» проектирования отдельных элементов и всего объекта проектирования в целом (иерархичность проектирования).

*Принцип совместимости* обеспечивает совместное функционирование составных частей САПР и сохраняет открытую систему в целом.

*Принцип типизации* ориентирует на преимущественное создание и использование типовых и унифицированных элементов. Типизации подлежат элементы, имеющие перспективу многократного применения. Типовые и унифицированные элементы периодически проходят экспертизу на соответствие современным требованиям САПР и модифицируются по мере необходимости.

*Принцип развития* обеспечивает пополнение, совершенствование и обновление составных частей САПР, а также взаимодействие и расширение взаимосвязи с автоматизированными системами различного уровня и функционального назначения.

Разработка САПР представляет собой крупную научно-техническую проблему, а ее внедрение требует значительных капиталовложений. Накопленный опыт позволяет выделить следующие основные особенности ее построения.

*САПР — человеко-машинная система.* Все создаваемые с помощью компьютера системы проектирования являются автоматизированными. Важную

роль в них играет человек — инженер, разрабатывающий проект технического средства. В настоящее время и, по крайней мере, в ближайшие годы создание САПР не угрожает монополии человека при принятии узловых решений в процессе проектирования. Человек должен решать в САПР, во-первых, задачи, формализация которых не достигнута, и, во-вторых, задачи, которые решаются человеком на основе эвристических способностей более эффективно, чем на современном компьютере. Тесное взаимодействие человека и вычислительной техники в процессе проектирования — один из принципов построения и эксплуатации САПР.

*САПР — иерархическая система.* Она реализует комплексный подход к автоматизации всех уровней проектирования. Блочный-иерархический подход к проектированию должен быть сохранен при применении САПР. Иерархия уровней проектирования отражается в структуре специального ПО САПР в виде иерархии подсистем.

Следует особо подчеркнуть целесообразность обеспечения комплексного характера САПР, так как автоматизация проектирования на одном из уровней при сохранении старых форм проектирования на соседних уровнях оказывается значительно менее эффективной, чем полная автоматизация всех уровней. Иерархическое построение относится не только к специальному программному обеспечению, но и к техническим средствам САПР, разделяемым на центральный вычислительный комплекс и автоматизированные рабочие места проектировщиков.

*САПР — совокупность информационно согласованных подсистем.* Информационная согласованность означает, что все или большинство последовательностей задач проектирования обслуживаются информационно согласованными программами. Две программы являются информационно согласованными, если все данные, которые представляют собой объект переработки в обеих программах, входят в наборы данных, не требующие изменений при переходе от одной программы к другой.

Так, информационные связи могут проявляться в том, что результаты решения одной задачи будут исходными данными для другой задачи. Если для согласования программ требуется существенная переработка общего массива данных с участием человека, который добавляет недостающие параметры, вручную перекомпоновывает массив или изменяет значения отдельных параметров, то это значит, что программы информационно плохо согласованы. Ручная перекомпоновка массива ведет к существенным временным задержкам, росту числа ошибок и поэтому снижает эффективность работы САПР. Плохая информационная согласованность превращает САПР в совокупность автономных программ, при этом из-за неучета в подсистемах многих факторов, оцениваемых в других подсистемах, снижается качество проектных решений.

Помимо рассмотренных, важен *принцип оптимальности связей* между САПР и внешней средой. Если каждый раз при проектировании очередного объекта заново вводятся в систему не только действительно новые специфичес-

кие исходные данные, но и сведения справочного характера (например, параметры унифицированных элементов), то имеет место нерациональная организация связей САПР с окружающей средой. Очевидно, что все данные, используемые многократно при проектировании разных объектов, должны храниться системой в *базе данных*.

*САПР — открытая и развивающаяся система.* Существуют, по крайней мере, две причины, по которым САПР должна быть изменяющейся во времени системой.

Во-первых, разработка столь сложного объекта как САПР занимает продолжительное время, и экономически выгодно вводить в эксплуатацию части системы по мере их готовности. Введенный в эксплуатацию базовый вариант системы в дальнейшем расширяется.

Во-вторых, постоянный прогресс вычислительной техники и вычислительной математики приводит к появлению новых, более совершенных математических моделей и программ, которые должны заменять старые, менее удачные аналоги. Поэтому САПР должна быть открытой системой, т. е. обладать свойством удобства включения новых методов и средств.

*САПР — специализированная система с максимальным использованием унифицированных модулей.* Чтобы снизить расходы на разработку многих специализированных САПР, целесообразно строить их на основе максимального использования унифицированных составных частей. Необходимое условие унификации — поиск общих положений в моделировании, анализе и синтезе разнородных технических объектов.

### **1.2.3 Состав и структура САПР**

Составными частями САПР, жестко связанными с организационной структурой проектной организации, являются подсистемы, в которых при помощи специализированных средств решается функционально законченная последовательность задач САПР. По назначению разделяют проектирующие подсистемы и обслуживающие.

*Проектирующие подсистемы* имеют объектную ориентацию и реализуют определенный этап (стадию) проектирования или группу непосредственно связанных проектных задач. Примеры проектирующих подсистем: эскизное проектирование изделий, конструирование корпусных деталей, проектирование технологических процессов механической обработки.

*Обслуживающие подсистемы* имеют общесистемное применение и обеспечивают поддержку функционирования проектирующих подсистем, а также оформление, передачу и вывод полученных в них результатов. Примеры обслуживающих подсистем: автоматизированный банк данных, подсистемы документирования, подсистема ввода-вывода.

Формирование и использование моделей объекта проектирования в прикладных задачах осуществляется *комплексом средств автоматизированного*

проектирования системы (или подсистемы). Структурными частями САПР являются различные комплексы средств, а также компоненты организационного обеспечения. Комплексы средств относят к промышленным изделиям, подлежащим изготовлению, тиражированию и применению в составе САПР, и документируют как специфицируемые изделия. Виды комплексов средств и компонентов САПР представлены на рисунке 1.5.

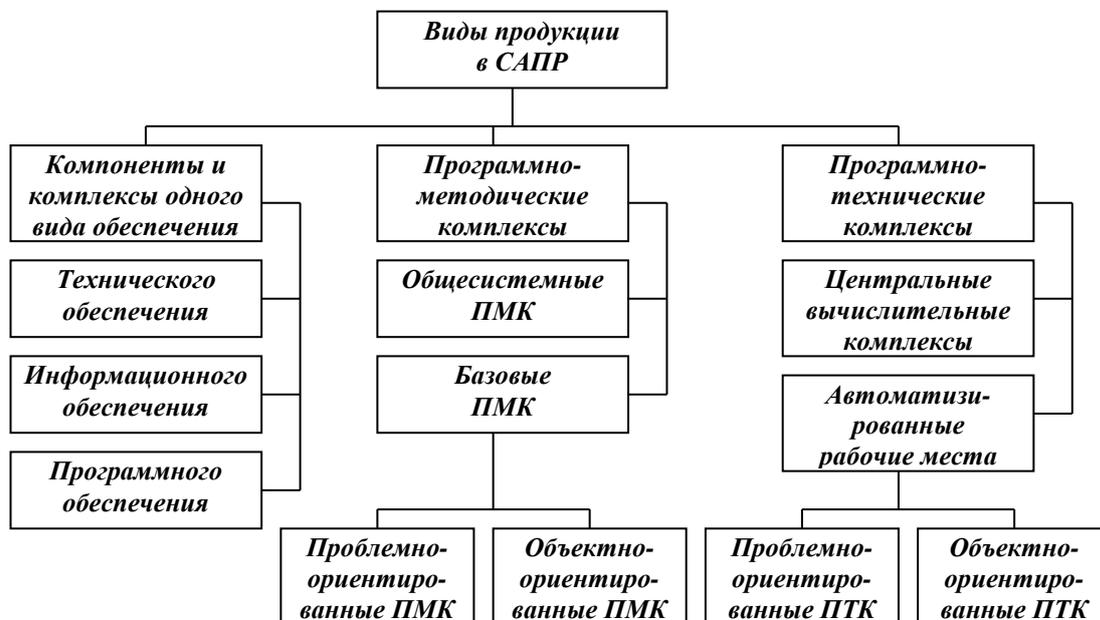


Рисунок 1.5 — Виды комплексов и компонентов САПР

Комплексы средств подразделяют на комплексы одного вида обеспечения (технического, программного, информационного) и комбинированные. Комплексы средств одного вида обеспечения содержат компоненты одного вида, а комбинированные — совокупность компонентов разных видов обеспечения. Комбинированные комплексы, относящиеся к продукции производственно-технического назначения, подразделяются на программно-методические (ПМК) и программно-технические (ПТК).

*Программно-методический комплекс* представляет собой взаимосвязанную совокупность компонентов программного, информационного и методического обеспечения (включая компоненты математического и лингвистического обеспечения), необходимую для получения законченного проектного решения по объекту проектирования (одной или нескольким его частям или объекту в целом) или выполнения унифицированных процедур. В зависимости от назначения ПМК подразделяют на общесистемные и базовые. Общесистемные ПМК направлены на объекты проектирования и вместе с компьютерными операционными системами являются операционной средой, в которой функционируют базовые комплексы. Базовые ПМК могут быть проблемно-ориентированными и объектно-ориентированными, в зависимости от того, реализуют они проектные

процедуры унифицированные или специфические для определенного класса объектов.

*Проблемно-ориентированные ПМК* могут включать программные средства, предназначенные для автоматизированного упорядочения исходных данных, требований и ограничений к объекту проектирования в целом или к сборочным единицам; выбор физического принципа действия объекта проектирования; выбор технических решений и структуры объекта проектирования; оценку показателей качества (технологичности) конструкций, проектирование маршрута обработки деталей.

*Объектно-ориентированные ПМК* отражают особенности объектов проектирования в совокупности как предметной области. К ним, например, относятся ПМК, поддерживающие автоматизированное проектирование сборочных единиц; проектирование деталей на основе стандартных или заимствованных решений; деталей на основе синтеза их из элементов формы; технологических процессов по видам обработки деталей и т. п.

*Программно-технический комплекс* представляет собой взаимосвязанную совокупность компонентов технического обеспечения. В зависимости от назначения ПТК различают *автоматизированные рабочие места (АРМ)* и центральные вычислительные серверы. Комплексы средств могут объединять свои вычислительные и информационные ресурсы, образуя распределенные вычислительные сети подсистем или систем в целом.

Структурными частями комплексов средств являются компоненты следующих видов обеспечения: программного, информационного, методического, математического, лингвистического и технического. Эти компоненты выполняют заданную функцию и представляют наименьший (неделимый), самостоятельно разрабатываемый или покупной элемент САПР (например, программа, инструкция, дисплей и т. п.).

Комплексы обслуживающих подсистем, а также отдельные ПТК могут использоваться при функционировании всех подсистем. Общесистемные ПМК включают в себя программное, информационное, методическое и другие виды обеспечения. Они предназначены для выполнения унифицированных процедур управления, контроля, планирования вычислительного процесса, распределения ресурсов САПР и реализации других функций, являющихся общими для подсистем или САПР в целом. Примеры общесистемных ПМК: мониторные системы, системы управления БД, информационно-поисковые системы, средства машинной графики, подсистема обеспечения диалогового режима и др.

*Мониторные системы управления функционированием* технических средств САПР (здесь монитор — это управляющая программа) выполняют следующие основные функции:

— формирование заданий с контролем пакета задач, требуемых и наличных ресурсов, права доступа к базе данных с установлением приоритета и номера очереди;

— обработка директив языков управления заданиями и задачами, а также реакция на прерывания с перехватом управления, анализом причин и их интерпретацией в терминах, понятных проектировщику;

— обслуживание потоков задач с организацией диалогового и интерактивно-графического сопровождения при параллельной работе подсистем;

— управление проектированием в автоматических режимах с анализом качества исполнения проектных операций, проверкой критериев повторения этапа или продолжения маршрута, выбором альтернативных вариантов;

— ведение и оптимизация статистики эксплуатации системы;

— распределение ресурсов САПР с учетом приоритетов заданий, задач и подсистем, плановых заданий и текущих указаний и запросов;

— защита ресурсов и данных от несанкционированного доступа и непредусмотренных воздействий.

*Информационно-поисковые системы (ИПС)* выполняют в САПР следующие функции:

— заполнение информационного фонда (инфотеки) сведениями;

— арифметическая обработка цифровых данных и лексическая обработка текстов;

— обработка информационных запросов с целью поиска требуемой информации;

— обработка поисковых данных и формирование выходных отчетных документов.

Особенности ИПС заключаются в том, что запросы к ним формируются не программным путем, а непосредственно пользователями и не в машинных кодах, а на естественном языке в виде последовательности ключевых слов-дескрипторов. Перечень дескрипторов, содержащихся во всех принятых на хранение описаниях, составляет словарь, или тезаурус, который предназначен для формирования поисковых предписаний.

Существуют и более сложные ИПС по сравнению с дескрипторными. Важную роль в них играет информационно-поисковый язык, в котором учитываются семантические взаимоотношения между информационными объектами. Это позволяет уменьшить число неправильно распознаваемых языковых конструкций, а обработку запросов производить на основе различных критериев смыслового соответствия.

*Система управления базами данных (СУБД)* — программный комплекс для обеспечения работы со структурированными данными как наиболее высокой формой организации информации в больших САПР. В проблемно-ориентированных информационно-справочных СУБД обеспечивается ввод необходимой информации, ее хранение в БД, вывод необходимой фактографической информации по запросам пользователей или программ.

СУБД выполняет следующие основные функции:

— определение баз данных, т. е. описание концептуального, внешнего и внутреннего уровней схем;

- запись данных в базу;
- организация хранения с выполнением изменения, дополнения, реорганизации данных;
- предоставление авторизованного доступа к данным.

Функции СУБД реализуются с помощью языка манипулирования данными и языка запросов стандарта SQL. По типу СУБД различают иерархические, сетевые, реляционные, объектно-реляционные (самые распространенные), нереляционные (для очень больших наборов данных).

*Программно-методические комплексы машинной графики* обеспечивают взаимодействие пользователя с компьютером при обмене графической информацией, решение геометрических задач, формирование изображений и их визуализацию. Графическое взаимодействие пользователя с компьютером базируется на подпрограммах ввода-вывода, которые обеспечивают прием и обработку команд от устройства ввода-вывода и выдачу управляющих воздействий на эти устройства.

Графические задачи решаются геометрическим моделированием и преобразованием графической информации путем последовательности элементарных операций типа сдвиг, поворот, масштабирование и т. п. Для трехмерных изображений применяются процедуры построения проекций, сечений и др. Для формирования наиболее часто используемых и типовых изображений создают графические БД и хранимые процедуры графических преобразований.

*Диалоговый режим* обеспечивается программно-методическими комплексами, осуществляющими ввод, контроль, редактирование, преобразование и вывод графической и (или) текстовой информации. Удаленный ввод и редактирование заданий выполняется через сетевые каналы связи в пакетном режиме, а результаты выводятся через линии связи на удаленные терминалы.

В САПР могут использоваться диалоговые ПМК как общего назначения, так и специализированные. ПМК общего назначения целесообразно применять на начальных стадиях создания и эксплуатации САПР для отработки и проверки методологии проектирования, технологии обработки данных и прикладных программ. В дальнейшем возможна модификация ПМК с учетом специфических требований по организации диалога в САПР. При этом необходимо учитывать наличие диалогового или пакетного режимов обработки запросов, ориентацию системы на пользователя-непрограммиста, возможность расширения системы путем включения диалоговых прикладных программ на языках высокого уровня, возможность управления диалогом с помощью меню и директив и т. п.

#### **1.2.4 Компоненты и виды обеспечения САПР**

Средства автоматизации проектирования можно сгруппировать по видам обеспечения САПР (рисунок 1.6).

<b><u>Основы автоматизации проектирования машин</u></b>					
<b>Математическое обеспечение</b>					
<i>Методы описания объекта, процесса</i>	<i>Экспериментально-статистические методы моделирования</i>	<i>Аналитические, численные и имитационные методы и системы моделирования</i>	<i>Методы оптимизации</i>	<i>Алгоритмы решения задач проектирования</i>	
<b>Программное обеспечение</b>					
<i>Базовые программы, операционные системы</i>	<i>Языки и системы программирования</i>	<i>Пакеты прикладных программ</i>	<i>Библиотеки прикладных программ</i>	<i>Диалоговые системы</i>	<i>Системы машинной графики</i>
<b>Техническое обеспечение – технические средства (ТС)</b>					
<i>ТС программной обработки данных</i>	<i>ТС подготовки и ввода данных</i>	<i>ТС отображения и документирования</i>	<i>ТС архива проектных решений</i>	<i>ТС передачи данных</i>	
<b>Информационное обеспечение</b>					
<i>Информационно-поисковые системы</i>	<i>Автоматизированные базы данных</i>	<i>Системы управления базами данных</i>	<i>Базы знаний</i>	<i>Экспертные системы</i>	

Рисунок 1.6 — Составные части автоматизации проектирования машин

**Математическое обеспечение.** Основу математического обеспечения (МО) САПР составляют алгоритмы, по которым разрабатывается программное обеспечение САПР. Элементы математического обеспечения САПР чрезвычайно разнообразны. Среди них имеются инвариантные элементы — принципы построения функциональных моделей, методы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, постановки экстремальных задач, поиски экстремума. Разработка математического обеспечения является самым сложным этапом создания САПР, от которого в наибольшей степени зависят производительность и эффективность функционирования САПР в целом.

По назначению и способам реализации МО САПР делится на две части:

- 1) математические методы и построенные на их основе математические модели, описывающие объекты проектирования;
- 2) формализованное описание технологии автоматизированного проектирования.

Способы и средства реализации первой части математического обеспечения наиболее специфичны в различных САПР и зависят от особенностей объектов проектирования. Что касается второй части математического обеспечения, то формализация процессов автоматизированного проектирования в комплексе оказалась более сложной задачей, чем алгоритмизация и программи-

рование отдельных проектных задач. При решении этой задачи должна быть формализована вся логика технологии проектирования, в том числе логика взаимодействия проектировщиков друг с другом на основе использования средств автоматизации. Математическое обеспечение САПР должно описывать во взаимосвязи объект, процесс и средства автоматизации проектирования.

Важным результатом совершенствования и типизации технологии процессов автоматизированного проектирования явилась разработка методических указаний Госстандарта «САПР. Типовые схемы проектирования изделий в условиях функционирования систем». В них подчеркивается, что процесс автоматизированного проектирования по составу и последовательности процедур, содержанию и формам проектной документации качественно отличается от традиционного процесса проектирования. Вместе с тем в процессе автоматизированного проектирования можно выделить определенное число процедур, инвариантных к объектам проектирования.

Перспективной для совершенствования и типизации технологии процессов автоматизированного проектирования является централизованная разработка математического аппарата моделирования типового процесса проектирования и выпуск базовых программно-методических комплексов, реализующих такие модели.

**Программное обеспечение САПР** представляет собой совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для автоматизированного проектирования. Программное обеспечение делится на общесистемное и специальное (прикладное).

*Общесистемное* ПО предназначено для организации функционирования технических средств, т. е. для планирования и управления вычислительным процессом, распределения имеющихся ресурсов, и представлено операционными системами вычислительных комплексов. Общесистемное ПО обычно создается для многих приложений и специфику САПР не отражает.

В *специальном (прикладном)* ПО реализуется математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур. Прикладное ПО обычно реализовано в виде пакетов прикладных программ (ППП), каждый из которых обслуживает определенный этап процесса проектирования или группу однотипных задач внутри различных этапов.

Рассмотрим принципиальные особенности ПО, влияющие на организацию и эффективность создания и использования САПР. С развитием вычислительной техники все большее значение приобретает такой компонент общесистемного ПО как операционные системы (ОС). Возможности, предоставляемые пользователям современными вычислительными средствами, в большей степени определяются их операционными системами, чем техническими устройствами. ОС организует одновременное решение различных задач на компьютере, динамическое распределение каналов передачи данных и внешних устройств между задачами, планирование потоков задач и последовательность их решения с учетом установленных критериев, динамическое распределение

памяти вычислительного комплекса. Однако ОС требует для своей работы определенные ресурсы процессора, внешней и основной памяти. Чем большими возможностями обладает ОС, тем больше требуется для нее ресурсов.

Операционные системы можно устанавливать применительно к определенным конфигурациям технических средств вычислительного комплекса и кругу решаемых задач. Но при этом параметры и состав технических средств ограничивают возможности ОС.

Важным компонентом общесистемного ПО является базовое ПО. Базовое ПО не является объектом разработки при создании программного обеспечения САПР. Примером может служить базовое ПО для обработки геометрической и графической информации, для организации БД. Использование базового ПО в составе АРМ позволяет реализовать стандартные проектные процедуры и существенно снизить трудоемкость создания ПО САПР. Однако во всех случаях за создателями САПР останется разработка прикладного ПО. С расширением области применения вычислительной техники и усложнением задач САПР возрастают сложность и трудоемкость программирования.

*Функциональные пакеты программ (ФПП)* — это комплекс программных средств, ориентированных на выполнение определенной функции, более или менее безотносительно к конкретному предметному содержанию (текстовые редакторы, обработка таблиц, графики).

*Интегрированные пакеты программ (ИПП)* — это сочетание разных пакетов программ в единой технологической системе. Интеграция может быть реализована соединением функциональных пакетов в целостную монолитную систему, представленную единым программным модулем, или путем создания набора вспомогательных средств интерфейсного характера для обеспечения взаимодействия пакетов, представленных независимыми модулями.

В последнее время общее признание получил модульный принцип построения программного обеспечения. Программы целесообразно разбивать на модули, для того чтобы упростить их разработку и реализацию, облегчить восприятие программы, упростить их отладку и модификацию, облегчить работу с данными, имеющими сложную структуру, избежать чрезмерной детализации алгоритмов, обеспечить более рациональное размещение программ в памяти компьютера.

Каждый модуль обычно представляет собой самостоятельную программу, предназначенную для расчета отдельных компонентов, систем или реализующую один из методов расчета или отдельную его процедуру. Модуль должен быть, как правило, независимым от рассматриваемых вариантов объекта, процесса, системы (структуры, режима функционирования и др.). Он должен быть тем элементом (компонентом), с помощью которого можно описать любой вариант объекта, процесса, системы. Наличие таких модулей позволяет свести к минимуму процесс дополнительного программирования, сократить время подготовки пользователя к работе. В процессе реальной работы с таким программным обеспечением проводится постоянная замена самих модулей или

отдельных компонентов, соответствующих тому или иному варианту объекта, процесса, системы, с максимальной унификацией ввода и вывода данных.

**Информационное обеспечение САПР.** Основу информационного обеспечения (ИО) САПР составляют данные, которыми пользуются проектировщики в процессе проектирования непосредственно для выработки проектных решений. Эти данные могут быть представлены в виде электронных документов на различных носителях, содержащих сведения справочного характера о материалах, комплектующих изделиях, типовых проектных решениях, параметрах элементов, о состоянии текущих разработок в виде промежуточных и окончательных проектных решений, структуры проектируемых объектов и т. п.

При этом данные, являющиеся результатом одного процесса преобразования, могут быть исходными для другого процесса. Совокупность данных, используемых всеми компонентами САПР, составляет информационный фонд САПР. Основная функция ИО САПР — ведение информационного фонда, т. е. обеспечение создания, поддержки и организации доступа к данным. Таким образом, ИО САПР есть совокупность информационного фонда и средств его обеспечения.

В состав информационного фонда САПР входят:

— программные модули, которые хранятся в виде символических и объектных текстов; как правило, эти данные мало изменяются в течение жизненного цикла САПР, имеют фиксированные размеры и появляются на этапе создания информационного фонда; потребителями этих данных являются различные подсистемы САПР;

— исходные и результирующие данные, которые необходимы при выполнении программных модулей в процессе преобразования; эти данные часто меняются в процессе проектирования, однако их тип постояен и полностью определяется соответствующим программным модулем; при организации промежуточных данных возможны конфликтные ситуации в процессе согласования между собой данных различных типов;

— нормативно-справочная проектная документация (НСПД), включающая в себя справочные данные о материалах, элементах схем, унифицированных узлах и конструкциях; эти данные, как правило, хорошо структурированы и могут быть отнесены к фактографическим; к НСПД относятся также государственные и отраслевые стандарты, руководящие материалы и указания, типовые проектные решения, регламентирующие документы;

— текущая проектная информация, отражающая состояние и ход выполнения проекта; как правило, эта информация слабо структурирована, часто изменяется в процессе проектирования и представляется в форме текстовых документов.

При выборе способов ведения информационного фонда САПР важно сформулировать принципы и определить средства ведения информационного фонда, структурирования данных, выбрать способы управления массивами данных.

Различают следующие способы ведения информационного фонда САПР: использование файловой системы, построение библиотек, использование банков данных, создание информационных программ адаптеров.

*Использование файловой системы и построение библиотек* широко распространено в организации ИО вычислительных систем, так как поддерживается средствами ОС. В приложениях САПР эти способы применяют при хранении программных модулей в символических и объектных кодах, диалоговых сценариев поддержки процесса проектирования, начального ввода крупных массивов исходных данных, текстовых документов. Однако они мало пригодны при обеспечении быстрого доступа к справочным данным, хранении меняющихся данных, ведении текущей проектной документации, поиске необходимых текстовых документов, организации взаимодействия между разноязычными модулями.

*Автоматизированные базы данных* в совокупности с СУБД — это специальным образом организованный программный комплекс, реализующий функции создания БД, ее обновления, хранения, защиты и выборки данных. В структурированных БД возможна организация четырех типов структуры данных — иерархическая, сетевая, реляционная и объектно-реляционная.

*Иерархическая структура БД* — это такая структура, в которой существует упорядоченная по уровням запись элементов объекта. В каждой группе записей один элемент считается главным, а другие элементы носят подчиненный характер. Группы записей упорядочиваются по уровням иерархии в строго определенной последовательности от самого низкого до корневого.

*Сетевая структура БД* — это такая структура, в которой элементарные данные и отношения между ними представляются в виде ориентированной сети: вершины — данные, дуги — отношения, связи. Такая структура позволяет пользователю получить доступ к нужному файлу без обращения ко всем другим файлам более высокого уровня интеграции.

*Реляционная и объектно-реляционная структура БД* — это БД, где элементарные данные (объекты) и отношения между ними представляются в виде таблиц и реляционных связей между ними. Столбцы таблицы — это атрибуты данных, а строки — записи об объектах. Основными достоинствами реляционных БД являются простота и гибкость хранения и доступа, а главным недостатком — меньшая производительность по сравнению с другими структурами БД из-за наличия большого количества правил и ограничений и необходимости их проверять при каждой транзакции для обеспечения целостности данных.

*Создание информационных программ адаптеров* было вызвано проблемой организации межмодульного интерфейса, которая привела к разработке специализированных систем и программной технологии. К ним относится, например, система, ориентированная на компоновку крупных программных комплексов из готовых модулей, где обмен данными происходит при помощи специализированных межмодульных информационных программ-адаптеров, реализующих следующие функции:

- контроль наличия исходных данных для каждого отдельного модуля;
- задание недостающих исходных данных;
- проверка соответствия типов, структур и последовательности данных аналогичным характеристикам данных, принятым в вызываемом модуле;
- преобразование данных при несоответствии типов;
- обеспечение передачи данных вызываемому модулю в соответствии с типом обмена;
- организация среды, определяемой языком программирования модуля;
- проверка результатов;
- выполнение обратного преобразования данных в вид, принятый для хранения промежуточных результатов;
- сохранение результатов работы модуля с возможностью дальнейшего использования.

В крупных САПР, программы которых оперируют большим числом входных, промежуточных и результирующих данных, области обмена удобно организовывать в виде структурированной БД. Это позволяет возложить часть функций, выполняемых адаптером, на СУБД, что в конечном итоге сокращает время на разработку ИО САПР. Таким образом, адаптер выполняет совокупность операций по организации информационного взаимодействия между программными модулями.

**Техническое обеспечение САПР.** Использование компьютерной техники позволило значительно снизить трудоемкость и продолжительность вычислительных работ. Но в процессе проектирования изделий и технологических процессов доля собственно вычислений не превышает 15%. Автоматизация проектирования потребовала выпуска специализированных средств САПР. Техническое обеспечение САПР представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для автоматизированного проектирования:

- периферийные устройства ввода-вывода;
- графические дисплеи с высокой разрешающей способностью;
- рулонные и планшетные графопостроители различного формата;
- кодировщики графической информации (дигитайзеры);
- устройства снятия растровой копии с изображения (сканеры);
- встроенные накопители на жестких дисках;
- внешние накопители на магнитных и оптических дисках;
- устройства связи с другими компьютерами по локальной сети, телефонной линии (модемы) и через Интернет.

Все большее применение в САПР находят компьютеры, мощности которых могут наращиваться в зависимости от сложности решаемых задач. В перспективе предусматривается переход к магистрально-модульной архитектуре АРМ, предполагающей, в частности, стандартизацию аппаратно-программных интерфейсов, в модификациях АРМ будет использована стандартная конструктивная база, построенная по международным стандартам. Программное обес-

печение АРМ намечено проводить централизованно и поставлять по заказам пользователей в составе ПТК. Основу технического обеспечения САПР составят типовые ПТК, требования к которым установлены ГОСТ.

**Лингвистическое обеспечение САПР.** Основу лингвистического обеспечения САПР составляют специальные языковые средства (языки проектирования), предназначенные для описания процедур автоматизированного проектирования и проектных решений. Основная часть лингвистического обеспечения — языки общения человека с компьютером.

Проблемно-ориентированные языки (ПОЯ) проектирования аналогичны универсальным алгоритмическим языкам программирования (Java, С и др.). В одних случаях ПОЯ строят таким образом, что описание любой задачи или задание на ее решение, в основном, содержит оригинальные термины физического и функционального содержания. Переход от физического и функционального описания задачи к компьютерным программам реализуется далее автоматически. В других случаях, например, при решении геометрических задач, ПОЯ соединяет в себе средства алгоритмического языка высокого уровня для решения вычислительных математических задач и специальные языковые средства моделирования геометрических объектов.

Очевидно, что ПОЯ хотя и называются языками, на самом деле представляют комплексы лингвистических и программных средств, которые должны включать набор терминальных символов ПОЯ, интерпретатор с ПОЯ, средства синтаксического анализа, средства пакетирования директив, библиотеки базовых функций ПОЯ, интерфейс для связи СУБД.

Возможности ПОЯ имеют исключительно важное значение в автоматизированном проектировании. Они не только влияют на производительность и уровень автоматизации проектирования, но и определяют сложность и характер работ проектировщиков со средствами САПР, могут сделать эти работы более привлекательными или наоборот. В последнем случае проектировщики будут явно и неявно противодействовать автоматизации. В настоящее время в мировой и отечественной практике существуют специальные методики и программные средства, значительно сокращающие трудоемкость создания ПОЯ. В частности, при разработке изобразительных средств может использоваться метасистема, позволяющая на основании заданной формальной грамматики получать соответствующий программный интерпретатор. При разработке программных модулей библиотеки базовых функций могут применяться любые алгоритмические языки высокого уровня. Однако чрезмерно большое разнообразие ПОЯ затруднит обмен средствами САПР между предприятиями и потребует обучения большого числа специалистов работе с несколькими языками. Таким образом, развитие гибких производственных систем требует определения состава лингвистического обеспечения САПР.

**Методическое обеспечение САПР.** Под методическим обеспечением САПР понимают входящие в ее состав документы, регламентирующие порядок ее эксплуатации. Причем документы, относящиеся к процессу создания САПР,

не входят в состав методического обеспечения. Так как документы методического обеспечения носят, в основном, инструктивный характер и их разработка является процессом творческим, то о специальных способах и средствах реализации данного компонента САПР говорить не приходится. В последнее время совершенствование организации работ в области автоматизации проектирования направлено на централизованное создание типовых ПМК с целью широкого тиражирования. Такие ПМК должны включать, наряду с компьютерными программами и базами данных, комплекты документации. Таким образом, указанная документация станет частью методического обеспечения САПР.

**Организационное обеспечение САПР.** Стандарты по САПР требуют выделения в качестве самостоятельного компонента организационного обеспечения, которое включает в себя положения, инструкции, приказы, штатные расписания, квалификационные требования и другие документы, регламентирующие организационную структуру подразделений проектной организации и взаимодействие подразделений с комплексом средств автоматизированного проектирования.

Функционирование САПР возможно только при наличии и взаимодействии перечисленных средств автоматизированного проектирования.

### **1.2.5 Классификация САПР**

В соответствии с ГОСТ 23501.108–85 [6], формализованное описание САПР включает в себя:

- 1) коды классификационных группировок САПР по установленным стандартом признакам классификации;
- 2) наименования классификационных группировок, соответствующие приведенным кодам;
- 3) указания, в соответствии с какими классификаторами, стандартами или методиками определены коды каждой классификационной группировки.

САПР характеризуют следующие признаки:

- 1) тип;
- 2) разновидность;
- 3) сложность объекта проектирования;
- 4) уровень автоматизации проектирования;
- 5) комплексность автоматизации проектирования;
- 6) характер выпускаемых проектных документов;
- 7) число выпускаемых проектных документов;
- 8) число уровней в структуре технического обеспечения САПР.

Три первых признака отражают особенности объектов проектирования, четыре следующих — возможности систем, восьмой признак — особенности технической базы САПР. Для получения даже общего представления о конкретной САПР она должна быть оценена по всем перечисленным признакам. Рассмотрим их подробнее.

*Тип объекта проектирования.* ГОСТ предусматривает деление САПР на девять групп:

- 1) САПР изделий машиностроения;
- 2) САПР изделий приборостроения;
- 3) САПР технологических процессов в машино- и приборостроении;
- 4) САПР объектов строительства;
- 5) САПР технологических процессов в строительстве;
- 6) САПР программных изделий;
- 7) САПР организационных систем.

Остальные группы (8 и 9) являются резервными и предназначены для выделения и кодирования САПР, не относящихся к перечисленным группировкам.

*Разновидность объектов проектирования.* ГОСТ не устанавливает специальных обозначений на объекты проектирования, а требует их указания и кодирования в соответствии с действующими в каждой отрасли промышленности системами обозначения документации на объекты, проектируемые системой.

*Сложность объекта проектирования.* Можно выделить САПР:

- 1) простых объектов с числом составных элементов до  $10^2$ ;
- 2) объектов средней сложности ( $10^2 - 10^3$ );
- 3) сложных объектов ( $10^3 - 10^4$ );
- 4) очень сложных объектов ( $10^4 - 10^6$ );
- 5) объектов самой высокой сложности (число составных элементов свыше  $10^6$ ).

Составной частью объекта проектирования, представляющего собой технический комплекс, сооружение или изделие, является деталь. Если объектом проектирования будет технологический процесс, то выделить его составные части сложнее. Существует два подхода, один из которых основан на разделении технологического процесса на элементарные технологические операции, другой — на разделении объекта на части условно в соответствии с номенклатурой выпускаемой технологической документации.

*Уровень автоматизации проектирования.* Выделяют следующие уровни системы проектирования:

- 1) низкоавтоматизированного (до 25% проектных процедур);
- 2) среднеавтоматизированного (25–50%);
- 3) высокоавтоматизированного (свыше 50%).

Чтобы отнести САПР по уровню автоматизации к третьей группе, в ней должны быть использованы методы многовариантного оптимального проектирования.

*Комплексность автоматизации проектирования.* По комплексности автоматизации различают САПР:

- 1) одноэтапные;
- 2) многоэтапные;
- 3) комплексные.

Если система автоматизации охватывает один из этапов проектирования соответствующего объекта, то ее относят к первой группе. Под комплексной САПР подразумевается автоматизация всех этапов проектирования.

*Характер выпускаемых проектных документов.* Установлено пять классификационных групп САПР, выпускающих документы:

- 1) на бумажном носителе;
- 2) на машинных носителях;
- 3) на фотоносителях (в виде сканов, фотошаблонов и др.);
- 4) комбинированные (документы на двух носителях данных или более);
- 5) эта группа является резервной.

*Число выпускаемых проектных документов.* Различают САПР малой, средней и высокой производительности. При этом число проектных документов в год в пересчете на формат А4 колеблется от  $10^3$  до  $10^6$ .

*Число уровней в структуре технического обеспечения.* Выделяют САПР одно-, двух- и трехуровневые.

Основу одноуровневого комплекса ТС составляют компьютеры среднего или высокого класса, в которых выполняется программная обработка и хранение данных, и стандартный набор периферийных устройств, входящих в состав АРМ. Быстрый рост возможностей вычислительной техники позволяет увеличить число терминалов комплекса и, следовательно, число одновременно работающих пользователей.

Таким образом, в одноуровневых САПР используются единая мониторинговая система, базы данных и пакеты прикладных программ, ориентированные на большинство компьютеров. Терминальные рабочие станции программно совместимы с сервером и служат либо для подготовки задач к решению на сервере, либо для решения простых задач с помощью тех же программных и информационных средств. Возможности одноуровневых САПР ограничены, поэтому в САПР крупных предприятий стремятся использовать компьютерную технику высокой производительности.

Для эффективной связи пользователя с САПР и решения большого количества менее сложных задач целесообразно иметь второй уровень САПР как интерактивно-графический комплекс. На каждом уровне имеются стандартные пакеты программ для выполнения одинаковых по содержанию проектных процедур, но ориентированных на различные размерности задач. Двухуровневые САПР могут иметь радиальную и кольцевую структуру. В последнем случае АРМ объединяются в кольцевую или иерархическую вычислительную сеть, где функции мониторинговой системы и СУБД распределены по узлам сети.

Трехуровневые САПР, помимо ТС двухуровневой системы, должны включать периферийное программно-управляемое оборудование, например чертежные графопостроители, установки для изготовления фотошаблонов, комплексы для контроля программ к станкам с числовым программным управлением (ЧПУ).

### 1.2.6 Взаимодействие САПР с другими автоматизированными системами

В условиях реального производства все виды систем автоматизации в той или иной степени должны взаимодействовать друг с другом, а САПР — непосредственно с автоматизированными системами научных исследований (АСНИ), технологической подготовки производства (АСТПП), управления производством (АСУП). Взаимодействие указанных систем осуществляется путем обмена информацией, представленной в виде бумажных документов или записанной в электронном виде на машинных носителях (доля такого обмена постепенно возрастает).

От АСУ все системы автоматизации должны получать управляющую информацию планового характера, а также информацию о фактическом наличии ресурсов. В свою очередь, в АСУ направляются данные о выполнении плановых заданий, о потребности в различных ресурсах, в том числе в материалах, комплектующих изделиях, инструменте, энергии.

Из АСНИ в САПР поступает информация о технических требованиях к проектируемому объекту, важных технических и конструкторских решениях, выработанных в результате математического моделирования объектов. В связи с развитием работ по комплексному моделированию проектируемых объектов, границы между «чистыми» исследованиями и проектированием стираются.

Сложные и трудоемкие расчеты на стадии исследовательского проектирования во многих случаях целесообразнее выполнять на основе исследовательской модели объекта и формировать данные о проектируемом объекте для последующих проектных работ одним из следующих способов:

- в виде матриц коэффициентов и математических зависимостей;
- в виде численных значений соответствующих параметров;
- (наиболее эффективно) в виде полной математической модели объекта, которую можно детализировать, уточнять и развивать.

С точки зрения эффективности автоматизации создание модели объекта и ее использование при проектировании должны быть объединены. В ходе проектирования могут появиться решения, которые следует вновь проверить на исходной модели и подтвердить дополнительными расчетами. В этом случае такие решения из САПР необходимо передать обратно в АСНИ. Таким образом, деление на САПР и АСНИ весьма условное — оно в большей степени отражает сложившуюся практику организации работ, а не суть выполняемых этими системами функций.

Системная интеграция разработки и производства изделий на основе единых математических моделей позволит в рамках крупных предприятий объединить автоматизированные системы научных исследований, системы автоматизированного проектирования, автоматизированные технологические комплексы и общие банки данных АСУП в интегрированную гибкую производственную систему. Это даст возможность обходиться без выпуска традицион-

ной проектно-конструкторской документации, так как результаты проектирования, полученные в САПР, будут использоваться непосредственно при составлении управляющих программ для станков с ЧПУ и роботов для изготовления деталей и сборочных единиц.

Наибольший эффект дает автоматизация проектирования наиболее сложных объектов, включая начальные стадии проектирования, принимаемые на этих стадиях проектные решения, улучшая характеристики будущего изделия. Ошибочное решение, если оно не будет исправлено на следующих стадиях, повлечет за собой большие потери при эксплуатации объекта. Активность, проявляемая зарубежными и отечественными предприятиями и организациями в области автоматизации проектирования узлов и деталей, вызвана тем, что оно отстало от уровня автоматизации проектирования крупных и сложных объектов, так как связано с автоматизацией конструкторских работ.

Совершенствование технологии автоматизированного проектирования повлечет за собой изменение деления проектирования на стадии и перераспределение проектных работ между стадиями. В частности, решение общих вопросов должно осуществляться на ранних стадиях, работы по оформлению проектных решений — на заключительной стадии. Режим работы проектировщика с компьютером полностью интерактивный. Основной рабочий режим пользователя — компьютер, подключенный к общей вычислительной сети. Языки общения проектировщиков с системой должны быть максимально приближены к естественному языку, возможен переход к устному общению. Все промежуточные проектные решения будут храниться в компьютере, окончательные решения передаваться в производство на машинных носителях.

Совершенствование технологии проектирования потребует существенного изменения состава технических средств САПР, программного и организационного обеспечения.

Развитие САПР отразится на содержании автоматизируемых проектных работ. Наиболее совершенные САПР будут автоматизировать все проектные операции, за исключением принятия решений, согласования их с исполнителем, составления пояснительных записок и других работ. Более того, в ряде случаев система будет формировать решение, и проектировщику останется только согласиться с ним или потребовать переработки части проекта.

## 2 Моделирование и конструирование в САПР

### 2.1 Математическое обеспечение принятия проектных решений

*МО САПР* — это совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых для решения задач автоматизированного проектирования (см. также п. 1.2.4). Разработку МО по праву можно считать одним из самых сложных и ответственных этапов создания САПР, непосредственно определяющим работоспособность, эффективность и производительность САПР при выполнении проектных процедур [9, 10].

При автоматизированном проектировании средства МО различаются для различных иерархических уровней описания технического объекта. При автоматизации проектирования специфика проектируемых объектов проявляется, прежде всего, в их математических моделях. По характеру отображаемых свойств проектируемого объекта модели разделяют на функциональные и структурные. *Структурные модели* отображают состав элементов и взаимосвязи между ними. *Функциональные модели* отображают процессы функционирования элементов и (или) объекта проектирования в целом.

В общем случае математическое описание технического объекта представляет собой функцию, связывающую выходные параметры  $Y$ , внутренние параметры элементов объекта  $V$  и входные параметры  $W$  [16]

$$Y = F(V, W).$$

Для компрессора, например, выходные параметры — производительность и давление, внутренние — геометрические размеры, входные — атмосферное давление и температура на входе.

Как упоминалось выше, процесс проектирования технического объекта (принятие проектного решения) делится на этапы, которые в свою очередь делятся на процедуры и операции.

#### 2.1.1 Проектные процедуры

Проектная процедура может многократно применяться при проектировании различных технических объектов. Проектные процедуры можно разделить на два типа: процедуры *синтеза* и процедуры *анализа*. Синтез состоит в создании описания объекта по его свойствам. Различают *структурный и параметрический синтез*.

##### *Процедуры анализа*

Целью выполнения анализа является определение свойств уже созданного объекта. Анализ может быть одновариантным и многовариантным.

При *одновариантном анализе* исследуются значения выходных параметров объекта при заданных значениях внутренних  $V$  и внешних  $W$  парамет-

ров. Задача заключается в однократном решении уравнений  $Y = F(V)$  при  $W = \text{const}$ , составляющих математическую модель. Как правило, для оценки свойств проектируемого объекта этого недостаточно. Нужно выполнять *многовариантный анализ*, — определять влияние внешних параметров, разброса и нестабильности внутренних параметров элементов на выходные параметры. Такой анализ требует многократного решения систем уравнений (многократного выполнения одновариантного анализа).

Чаще всего *многовариантный анализ* в САПР выполняется в интерактивном режиме, когда разработчик неоднократно меняет в математической модели те или иные параметры из множества входных параметров и параметров элементов, выполняет одновариантный анализ и фиксирует полученные значения выходных параметров. Подобный многовариантный анализ позволяет оценить *области работоспособности* (области, в которой значения всех выходных параметров находятся в допустимых по ТЗ пределах), степень выполнения условий работоспособности, а следовательно, степень выполнения ТЗ на проектирование, разумность принимаемых промежуточных решений по изменению проекта и т. п.

Определение чувствительности является разновидностью процедуры анализа и осуществляется нахождением производной целевой функции по входному параметру  $dY/dW$ .

### 2.1.2 Структурный синтез

Задача *структурного синтеза* заключается в поиске структуры технического объекта для выполнения заданных функций в рамках выбранного принципа действия. Структурный синтез является этапом, на котором закладывается эффективность принимаемых проектных решений. Результаты структурного синтеза представляются в виде структурной схемы — перечня элементов вместе с таблицей соединений, схемы расположения элементов и т. п.

Согласно ГОСТ 2.701–2008 [4], на структурной схеме изображаются основные элементы проектируемой системы, а также указываются взаимосвязи между ними. Структурная схема должна давать наглядное представление о последовательности взаимодействия элементов проектируемого объекта. Элементы проектируемого объекта обозначаются на структурной схеме в соответствии с условными обозначениями.

Задачи структурного синтеза являются сложно формализуемыми. Это связано с большим числом факторов, влияющих на вид, свойства и параметры синтезируемых структур, а также с большой размерностью задач детального описания синтезируемых объектов.

Для реализации процедур структурного синтеза необходимо иметь формализованное описание знаний о предметной области, которые включают в себя сведения об объектах синтеза и о правилах синтеза и порядке их применения. Данные об объектах синтеза могут быть представлены в виде отдельных

базовых элементов, макроэлементов (комплекса базовых элементов), законченных структур (готовых вариантов структур), обобщенных структур (набора всех элементов и макроэлементов, которые хотя бы однажды встречались в законченных структурах, без дублирования).

Существует несколько подходов к решению задач структурного синтеза [10, 13]. Наиболее часто используемые (рисунок 2.1): перебор законченных структур, наращивание структуры, усечение максимального набора элементов (выделение). Каждый из подходов требует определенных сведений об области применения и о требованиях к проектируемому объекту. Для каждого из подходов существуют определенные алгоритмы синтеза.



Рисунок 2.1 — Классификация алгоритмов структурного синтеза

Реальные алгоритмы структурного синтеза обычно являются комбинированными: сочетают черты разных подходов. Например, в последовательных алгоритмах наращивания возможен перебор претендентов на роль очередного добавленного элемента.

### ***Метод перебора вариантов***

Наиболее простым и чаще всего применяемым на практике методом структурного синтеза является *метод перебора вариантов*, результат работы которого во многом зависит от состава отобранных кандидатов. Метод перебора позволяет выбрать наилучший вариант из существующих. Создать принципиально новый технический объект при этом нельзя.

Этот метод применяют, когда сложно оценить промежуточные варианты, поэтому альтернативами для оценки являются законченные структуры объектов. Существуют разные способы создания множества вариантов: выбор из имеющейся библиотеки готовых решений, генерация из элементов и макроэлементов по определенным правилам, частичное изменение одной или нескольких первоначально заданных базовых структур. Полный перебор возможен только для задач, у которых множество вариантов мало. В реальных задачах множество вариантов достаточно велико и перебор может быть только неполным, основанным на эвристических алгоритмах.

При выборе лучшего из готовых вариантов структур вначале нужно дать оценку вариантам, затем эти оценки сравнить и после этого выбрать вариант с наивысшей оценкой. Эта процедура была бы простой, если бы варианты можно было оценить по одной шкале. На практике каждый вариант характеризуется многими измерениями. Пока варианты технических решений (ТР) представлены лишь структурной схемой, дать количественную оценку таким свойствам объекта, как масса, производительность, стоимость — сложно. Еще сложнее оценить надежность, эргономичность, эстетичность. Не облегчает задачу и неравнозначность признаков: одни более важны, другие — менее, третьи — противоречивы.

Одной из разновидностей метода перебора является перебор вариантов по результатам экспертных оценок. Для реализации метода экспертных оценок Т. Саати [18] предложен метод анализа иерархий (МАИ), позволяющий принимать наилучшие решения в задачах со многими критериями.

МАИ позволяет принимать наилучшие решения в задачах со многими критериями путем взвешивания альтернативных вариантов, удовлетворяющих некоторому набору требований. Требования, параметры и варианты технических решений представляются в виде иерархии.

Определение приоритетов параметров нижнего уровня относительно цели сводится к последовательности попарных сравнений. Выбор решения осуществляется также на основе их приоритетов по отношению к иерархии целей и параметров.

Исходными данными для попарного сравнения объектов  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , где  $n$  — число объектов (параметров или технических решений), являются относительные веса пары объектов, задаваемые в соответствии с таблицей 2.1.

Таблица 2.1 — Таблица относительных весов

Оценка	Важность
1	Равенство
2	Слабое превосходство
3	Сильное превосходство
4	Значительное превосходство
5	Абсолютное превосходство

Относительные веса формируют матрицу попарных сравнений  $A=a_{ij}$ ,  $i, j = 1 \dots n$ . Элементы матрицы  $A$  обладают следующими свойствами:

- 1) если  $a_{ij}=\lambda$ , то  $a_{ji} = 1/\lambda$ ,  $\lambda \neq 0$ ;
- 2) если важности  $X_i$  и  $X_j$  одинаковы, то  $a_{ij}=1$ ;
- 3) значение относительной важности при сравнении объекта с самим собой равно 1, т. е.  $a_{ij}=1$  для всех  $i=j$ .

Согласно этим свойствам, матрица  $A$  имеет следующий вид

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Каждый элемент матрицы  $A$

$$a_{ij} = w_i / w_j, \quad i, j = 1 \dots n, \quad (2.2)$$

где  $w_i$  — абсолютный вес объекта  $X_i$ ,  $w_j$  — абсолютный вес объекта  $X_j$ .

Необходимо по  $a_{ij}$  определить веса  $w_i$ . Даже для опытного эксперта возникает ошибка в определении  $w_i$  из матрицы  $A$ . Более правдиво вместо

$$w_i = a_{ij} w_j \quad (2.3)$$

принять

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j, \quad i = 1 \dots n. \quad (2.4)$$

Решение будет единственным, если заменить  $n$  в (2.4) на максимальное собственное значение матрицы  $\lambda_{\max}$ , близкое к  $n$ , тогда

$$w_i = \frac{1}{\lambda_{\max}} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j, \quad i = 1 \dots n. \quad (2.5)$$

Согласно теории матриц, если элементы  $a_{ij}$  положительной обратносимметричной матрицы, а именно такой является матрица  $A$ , незначительно изменить, то собственные значения изменятся также незначительно, причем все они будут равны нулю, за исключением одного  $\lambda_{\max}$ , равного  $n$ . Близость  $\lambda_{\max}$  к  $n$  можно считать мерой согласованности элементов матрицы  $A$ .

Для нахождения приоритетов нужно найти собственный вектор  $w$ , удовлетворяющий уравнению

$$A w = \lambda_{\max} w. \quad (2.6)$$

Поскольку необходимо иметь единственное решение, то выбираем его нормализованным, накладывая дополнительное требование

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (2.7)$$

Индекс согласованности ( $u/c$ )

$$u/c = (\lambda_{\max} - n)/n. \quad (2.8)$$

Экспериментально установлено, что если  $u/c < 0,1$ , то согласованность суждений можно считать удовлетворительной. Используя уравнение (2.6), находим локальные приоритеты  $w_i$  параметров и вариантов решений.

Величина влияния параметров  $m$ -го уровня иерархии на вершину дерева (глобальные приоритеты) определяются перемножением локальных приоритетов соответствующих вышестоящих в иерархии параметров

$$G_{mi} = w_{1i} \cdot w_{2i} \cdot \dots \cdot w_{mi}, \quad (2.9)$$

где  $G_{mi}$  — глобальный приоритет  $i$ -го параметра, расположенного на уровне иерархии  $m$ .

Глобальные приоритеты кандидатов  $G_{ki}$  получаются суммированием произведений локальных приоритетов кандидатов относительно каждого из параметров и глобальных приоритетов соответствующих параметров

$$G_{ki} = \sum w_{ki} G_{mi}, \quad (2.10)$$

где  $i = 1 \dots n$  — количество кандидатов выбора,  $m$  — количество параметров на последнем уровне иерархии. Лучшим считается техническое решение, имеющее наибольшее значение глобального приоритета.

Рассмотрим механизм работы МАИ на примере выбора структурной схемы высоковакуумного агрегата, к которому предъявлено несколько требований. Достижение каждого из требований обеспечивается определенным набором параметров. Иерархия процесса выбора структурной вакуумной схемы представлена на рисунке 2.2.

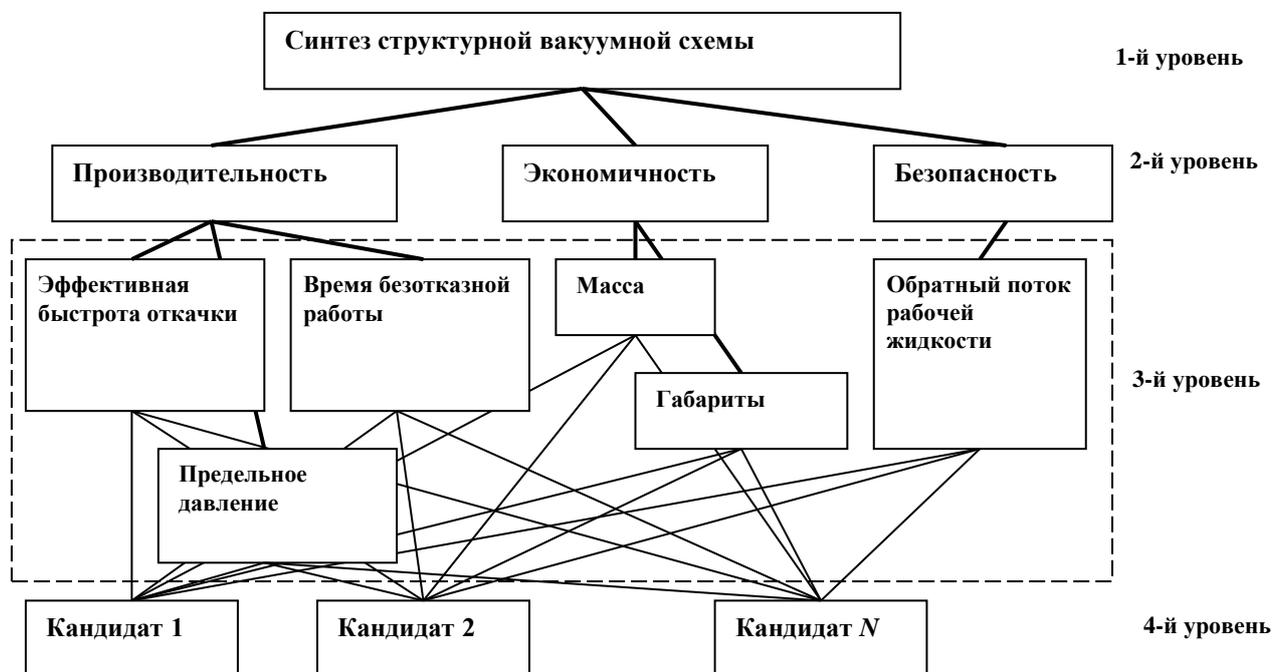


Рисунок 2.2 — Иерархическая модель процесса выбора схемы вакуумного агрегата, обладающего высокой производительностью, экономичностью и безопасностью

На первом уровне иерархии располагается цель — синтез структурной вакуумной схемы. На втором — требования (подцели) — производительность, экономичность и безопасность. Третий уровень иерархии составляют параметры — эффективная быстрота откачки, предельное давление, время безотказной работы, масса, габариты, обратный поток рабочей жидкости. На последнем уровне иерархии находятся кандидаты выбора. Порядок расстановки требований, параметров и кандидатов в иерархии не отражает их действительной важности. В качестве кандидатов выбора вакуумного агрегата, предназначенного для работы в высоком вакууме, предлагаются схемы, изображенные на рисунках 2.3–2.7.

Экспертам необходимо выполнить попарные сравнения подцелей, отвечая на вопросы такого рода: «Какая из пары подцелей наиболее важна для выбора лучшей структурной схемы агрегата, удовлетворяющего описанным выше требованиям?». Результаты попарных сравнений представлены в таблице 2.2. Последний столбец таблицы содержит локальные приоритеты подцелей.

Далее необходимо определить приоритеты параметров по отношению к соответствующей подцели иерархии. Теперь экспертам предстоит ответить на такие вопросы: «Какой из двух параметров, «Эффективная быстрота откачки» или «Предельное давление», наиболее важен для выполнения подцели «Производительность»?». Возможные варианты попарных сравнений представлены в таблице 2.3.

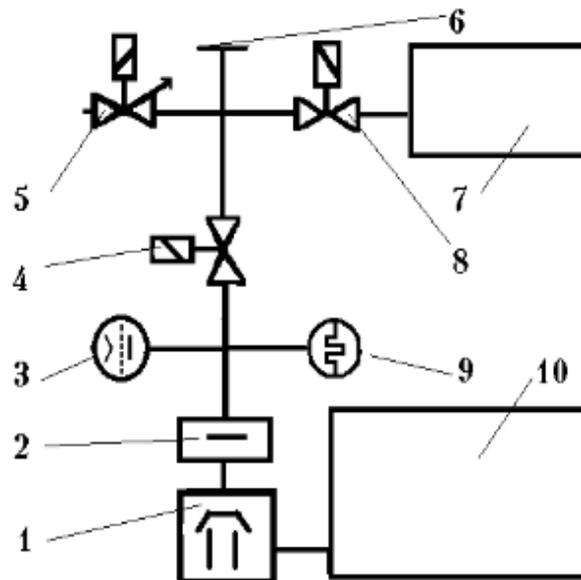


Рисунок 2.3 — Структурная схема агрегата на базе пароструйного насоса: 1 — насос; 2 — ловушка; 3 — тепловой манометр; 4, 8 — электромагнитные клапаны; 5 — натекатель; 6 — вход в откачиваемый объект; 7 — агрегат на базе пластинчато-роторного насоса; 9 — ионизационный манометр; 10 — агрегат на базе двухроторного насоса

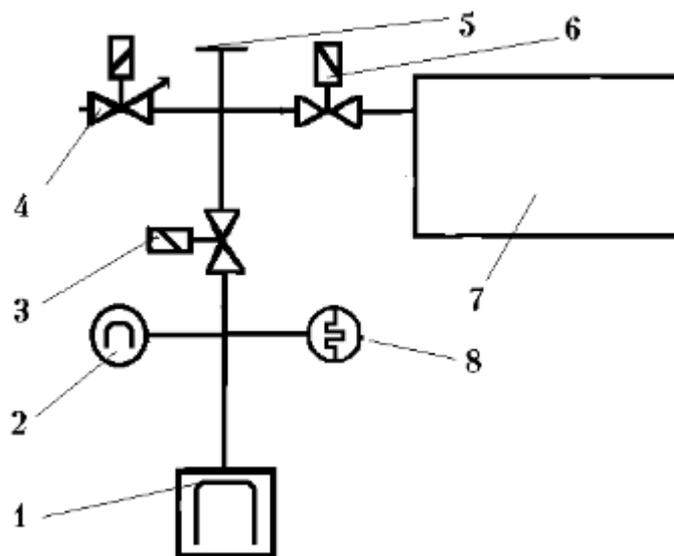


Рисунок 2.4 — Структурная схема агрегата на базе магниторазрядного насоса: 1 — насос; 2 — магнитный манометр; 3 — электромеханический затвор; 4 — натекатель; 5 — вход в откачиваемый объект; 6 — электромагнитный клапан; 7 — агрегат на базе адсорбционного насоса; 8 — тепловой манометр

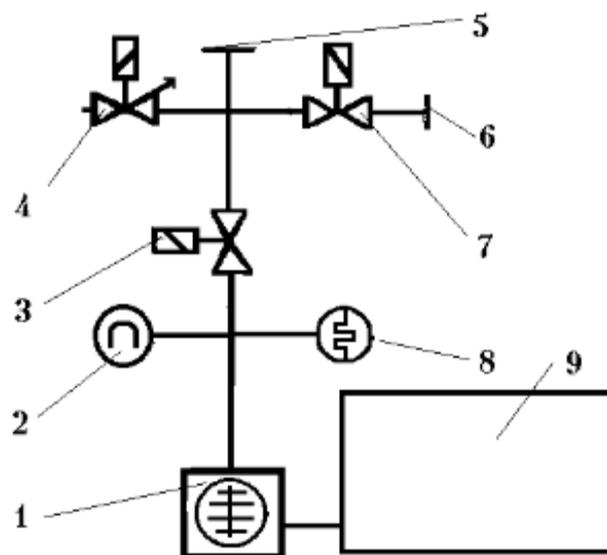


Рисунок 2.5 — Структурная схема агрегата на базе турбомолекулярного насоса: 1 — насос; 2 — магнитный манометр; 3 — электромеханический затвор; 4 — натекатель; 5 — вход в откачиваемый объект; 6 — обходная откачка; 7 — электромагнитный клапан; 8 — тепловой манометр; 9 — агрегат на базе пластинчато-роторного насоса

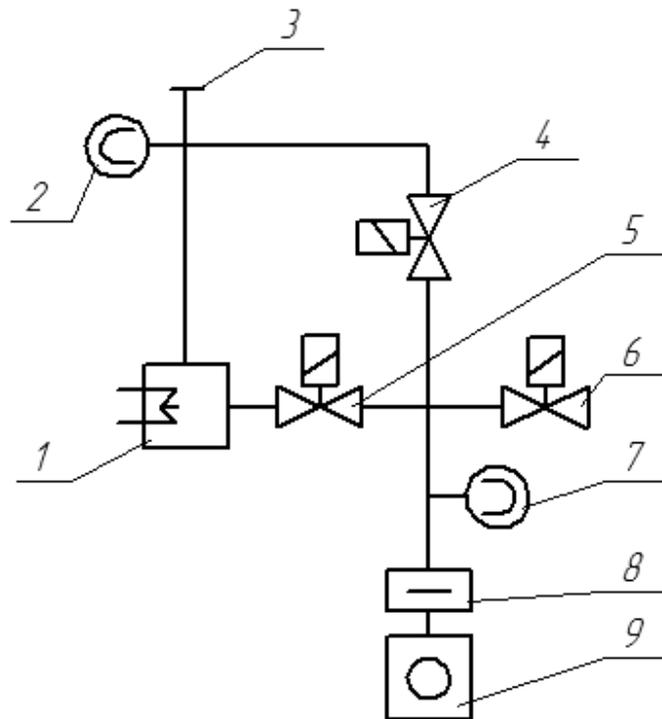


Рисунок 2.6 — Структурная схема агрегата на базе криогенного насоса: 1 — криогенный насос; 2, 7 — ионизационные манометры; 3 — вход в откачиваемый объект; 4, 5 — электромагнитные клапаны; 6 — натекатель; 8 — ловушка; 9 — пластинчато-статорный насос

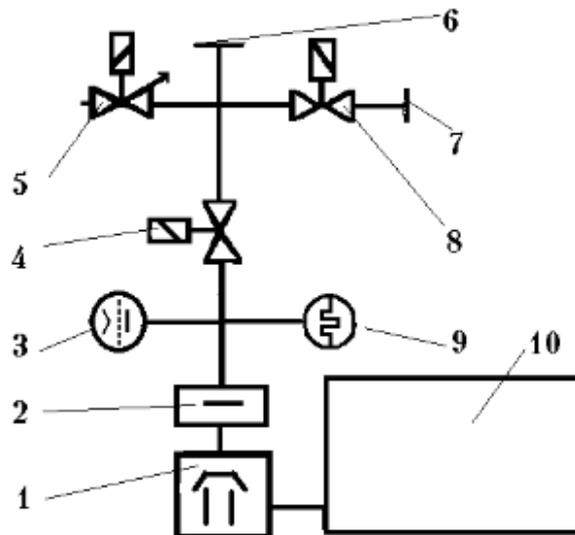


Рисунок 2.7 — Структурная схема агрегата на базе пароструйного насоса: 1 — насос; 2 — ловушка; 3 — ионизационный манометр; 4, 8 — клапаны; 5 — натекатель; 6 — вход в откачиваемый объект; 7 — обходная откачка; 9 — тепловой манометр; 10 — агрегат на базе пластинчато-роторного насоса

Таблица 2.2 — Результаты попарных сравнений и локальные приоритеты подцелей

Подцель	1	2	3	Локальный приоритет
Производительность (1)	1	1/3	2	0,294
Экономичность (2)	3	1	2	0,529
Безопасность (3)	1/2	1/2	1	0,177
<b><math>u/c = 0,003</math></b>				1,000

Таблица 2.3 — Результаты попарных сравнений и локальные приоритеты параметров по отношению к подцели «Производительность»

Параметр	1	2	3	Локальный приоритет
Эффективная быстрота откачки (1)	1	2	4	0,535
Предельное давление (2)	1/2	1	3	0,344
Время безотказной работы (3)	1/4	1/3	1	0,121
<b><math>u/c = 0,01</math></b>				1,000

Аналогично определяются локальные приоритеты оставшихся параметров. Глобальные приоритеты параметров определяются по формуле (2.9). Так, для параметра «Эффективная быстрота откачки» глобальный приоритет находится следующим образом

$$G_{m1} = 0,294 \cdot 0,535 = 0,157.$$

Значения локальных и глобальных приоритетов параметров сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 — Локальные и глобальные приоритеты параметров

Параметр	Локальный приоритет по отношению к подцели			Глобальный приоритет
	Производительность	Экономичность	Безопасность	
Эффективная быстрота откачки	0,535	—	—	0,157
Предельное давление	0,344	—	—	0,101
Время безотказной работы	0,121	—	—	0,036
Масса	—	0,333	—	0,176
Габариты	—	0,667	—	0,353
Обратный поток жидкости	—	—	1	0,177

После определения глобальных приоритетов всех параметров переходят к определению локальных приоритетов кандидатов по отношению к каждому из параметров. Экспертам необходимо ответить на подобные вопросы: «Какой из пары сравниваемых кандидатов наилучшим образом отвечает требованиям безопасности?» В таблице 2.5 приведены примеры попарных сравнений для кандидатов по отношению к параметру «Эффективная быстрота откачки».

Таблица 2.5 — Результаты попарных сравнений и локальные приоритеты кандидатов по отношению к параметру «Эффективная быстрота откачки»

№ кандидата	1	2	3	4	5	Локальный приоритет
Кандидат 1	1	4	1	3	2	0,306
Кандидат 2	1/4	1	1/5	1/2	1/3	0,063
Кандидат 3	1	5	1	3	2	0,334
Кандидат 4	1/3	2	1/3	1	1	0,130
Кандидат 5	1/2	3	1/2	1	1	0,167
<b><math>u/c = 0,09</math></b>						1,000

Аналогично определяются локальные приоритеты кандидатов по отношению к оставшимся параметрам.

Для определения глобальных приоритетов воспользуемся формулой (2.10). Значения локальных и глобальных приоритетов кандидатов сведены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 — Локальные и глобальные приоритеты кандидатов

№ кандидата	Локальные приоритеты кандидатов по отношению к параметрам						Глобальный приоритет
	Эффективная быстрота откачки (0,157)	Предельное давление (0,101)	Время безотказной работы (0,036)	Масса (0,176)	Габариты (0,353)	Обратный поток жидкости (0,177)	
Кандидат 1	0,306	0,185	0,276	0,201	0,212	0,071	0,199
Кандидат 2	0,063	0,271	0,202	0,249	0,240	0,187	0,206
Кандидат 3	0,334	0,207	0,066	0,161	0,171	0,294	0,217
Кандидат 4	0,130	0,060	0,175	0,274	0,276	0,139	0,203
Кандидат 5	0,167	0,277	0,281	0,115	0,101	0,309	0,175

Для кандидата 1, например, значение глобального приоритета определяется как

$$G_k = 0,306 \cdot 0,157 + 0,185 \cdot 0,101 + 0,276 \cdot 0,036 + 0,201 \cdot 0,176 + 0,212 \cdot 0,353 + 0,071 \cdot 0,177 = 0,199.$$

Наибольшим значением глобального приоритета обладает кандидат 3 (рисунок 2.5). Это означает, что наилучшим высоковакуумным агрегатом, к которому предъявляются требования повышенной производительности, экономичности и безопасности является агрегат на базе турбомолекулярного насоса.

Достоинство МАИ заключается в том, что веса критериев и субъективные оценки назначаются экспертами не прямо, а на основе попарных сравнений. Также, удобным и интуитивно понятным является иерархическое представление критериев. Однако некоторую сложность может вызвать понятие «превосходства в N раз», используемое при попарном сравнении.

## **Метод усечения максимального набора элементов**

Реализация метода усечения максимального набора элементов заключается в последовательном исключении элементов из обобщенной избыточной структуры. Такой подход удобен в тех отраслях, где для структур проектируемых объектов свойственно присутствие большого числа общих элементов. Обобщенная структура представляет собой совокупность описаний большого числа структур без дублирования одинаковых фрагментов. Это описание значительно более компактно, чем простое объединение описаний отдельных структур. Обобщенную структуру необходимо создать, предварительно проанализировав существующие решения и обобщив имеющийся инженерный опыт проектирования в конкретной предметной области. Со временем такая обобщенная структура объектов может дополняться новыми элементами. Синтез допустимых решений, согласно идеологии метода усечения, заключается в последовательном сравнении условий конкретного ТЗ с условиями функционирования каждого элемента обобщенной структуры. По результатам такого сравнения принимается решение о сохранении или исключении элемента из синтезируемой структуры. Лучшее ТР из списка допустимых отбирается по результатам оценки на основании созданной заранее модели оценки технических решений.

Среди средств описания обобщенных структур наиболее распространены морфологические таблицы, ориентированные графы и двудольные (альтернативные) графы — И-ИЛИ деревья.

Морфологическая таблица представляет собой обобщенную структуру, содержащую множество функций, конструктивных элементов и признаков, присущих объектам рассматриваемого класса, и способов их реализации. Каждой функции или конструктивному элементу соответствует одна строка таблицы, каждому способу ее реализации — одна ячейка в этой строке. Данных о способах синтеза непосредственно таблица не содержит. В таблице 2.7 приведен пример морфологической таблицы для решения задачи синтеза рациональных компоновочных вариантов виброзащитных систем [1].

Таблица 2.7 — Морфологическая таблица

<b>Признак</b>	<b>Значение признака</b>			
к1- упругий элемент	к11- торсионный	к12- пневматический	к13- пружинный	к14- гидравлический
к2- направляющий механизм	к21- параллелограмм	к22- типа «ножницы»	к23- поступательная	
к3- инерционный элемент	к31- динамический (осциллятор)	к32- динам. маятниковый корректор	к33- инерц. элемент отсутствует	к34- динам. вращательный корректор
к4- демпфирующий элемент	к41- гидравлический	к42- фрикционный	к43- демпф. элемент отсутствует	

Любую морфологическую таблицу можно представить в виде И-ИЛИ дерева (рисунок 2.8). Вершинами такого дерева являются структурные элементы (в зависимости от уровня детализации это могут быть отдельные модули, узлы или детали) и признаковые И-ИЛИ вершины. Корневая вершина у такого дерева одна.

И-ИЛИ дерево — удобный и интуитивно понятный проектировщику способ представления множества ТР и выбора на нем элементов, отвечающих требованиям ТЗ. Алгоритмизация структурного синтеза на базе И-ИЛИ деревьев требует введения правил выбора альтернатив в каждой вершине ИЛИ. Эти правила чаще всего имеют эвристический характер, связаны с требованиями ТЗ, могут отражать запреты на сочетания определенных компонентов структур.

Существует несколько способов построения обобщенной структуры в виде И-ИЛИ дерева: путем последовательного присоединения альтернативных элементов и признаков, свойственных отдельным ТР; объединения деревьев, описывающих отдельные ТР; построения отдельных деревьев внутри подмножеств ТР, а затем их объединения.

Синтез технических объектов с использованием И-ИЛИ деревьев рекомендуется использовать для технических систем, отличающихся слабой конструктивной связностью элементов (имеющих не более трех функциональных связей с другими элементами) [12].

Ориентированный граф (рисунок 2.9) состоит из узлов, которым соответствуют варианты элементной базы и направленных ребер — возможных соединений элементов материальными связями. Задача структурного синтеза включает выделение на графе множества возможных путей с учетом качественной и количественной совместимости задействованных элементов. Выбор наилучшего варианта ТР (путь на графе среди выделенных) выполняется по критерию минимума целевой функции проектирования.

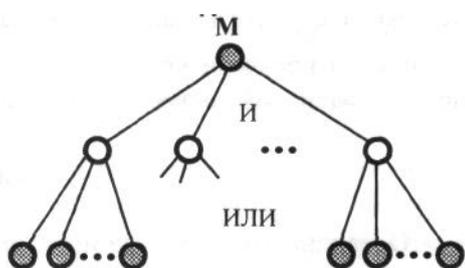


Рисунок 2.8 — И-ИЛИ дерево

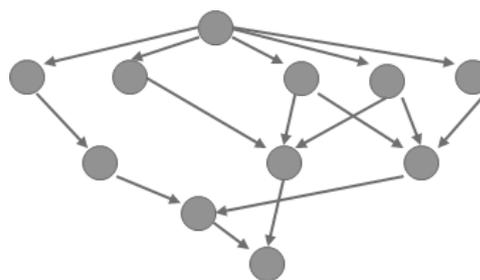


Рисунок 2.9 — Ориентированный граф

### ***Синтез структурной вакуумной схемы методом усечения***

Метод усечения взят за основу при формировании БД экспертной системы (ЭС) проектирования структурных вакуумных схем [17]. Синтез осуществляется постепенным исключением элементов из обобщенной избыточной структуры вакуумных агрегатов (рисунок 2.10).

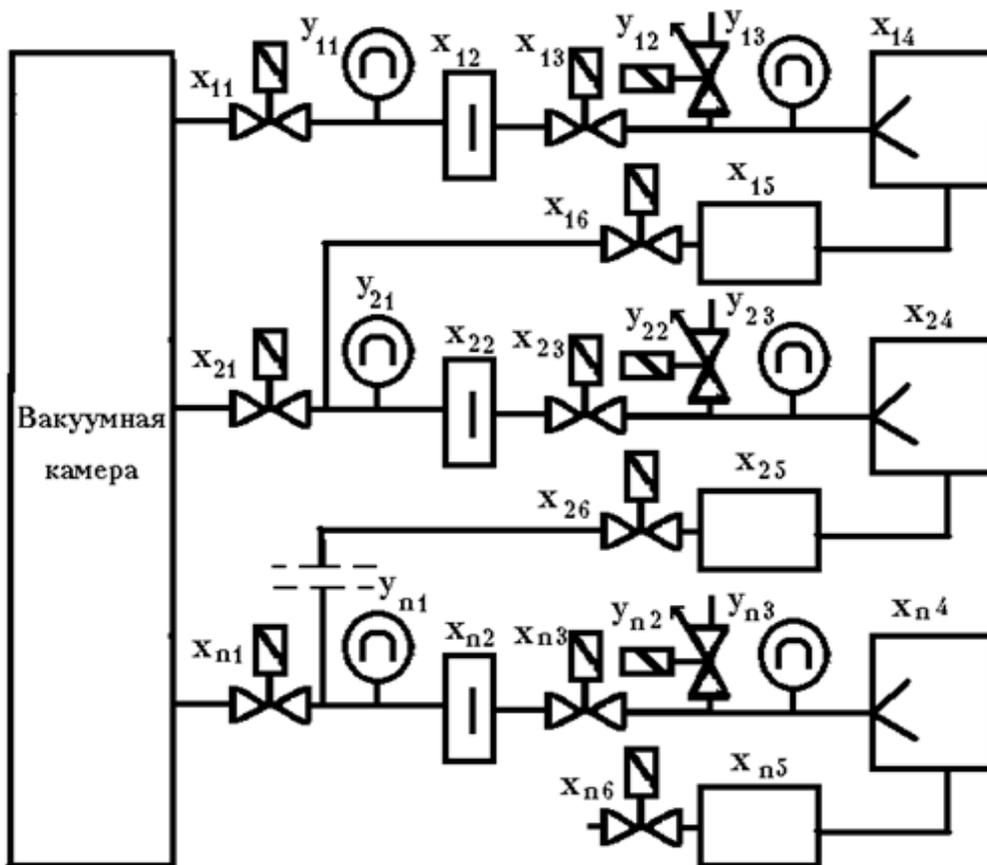


Рисунок 2.10 — Элементы типовой вакуумной схемы:  
 $x_{11} \dots x_{n6}$  — элементы проточной части;  
 $y_{11} \dots y_{n3}$  — вспомогательные элементы

Для принятия решений о сохранении и (или) исключении элемента из типовой схемы используются правила вида «ЕСЛИ–ТО», составляющие БД. Фактами в БД являются требования, которые предъявляются к проектируемому агрегату (фактически это техническое задание на проектирование). Список требований представлен в таблице 2.8.

Наличие конкретных требований повлечет за собой определенные действия при проектировании структуры, которые отражены в правилах БД. Например, наличие требования  $d_{10}$  приводит к необходимости использования безмасляных средств откачки.

Знания в экспертной системе представлены в виде продукционных правил, которые разбиты на блоки, что позволяет несколько упростить механизм вывода. Содержимое БД и результаты выполнения отдельных блоков приведены в таблице 2.9.

Например, блок выбора насоса для сверхвысоковакуумной ветви, помимо прочих, содержит следующее правило

$$\text{если } d_1 \wedge d_7 \wedge d_8 \wedge d_9 \wedge d_{11}, \text{ то } x_{12} = x_{13} = x_{15} = x_{16} = y_{11} = 0, \\ x_{14} \text{ — магниторазрядный насос.}$$

Таблица 2.8 — Факты БД

Обозначение	Содержание
$d_1$	Сверхвысокий вакуум
$d_2$	Высокий вакуум
$d_3$	Средний вакуум
$d_4$	Низкий вакуум
$d_5$	Уменьшить время откачки
$d_6$	Стабильная газовая нагрузка
$d_7$	Хорошая откачка гелия
$d_8$	Хорошая откачка неона
$d_9$	Хорошая откачка водорода
$d_{10}$	Отсутствие паров масла
$d_{11}$	Снижение капитальных затрат
$d_{12}$	Снижение эксплуатационных затрат
$d_{13}$	Применение хладагентов
$d_{14}$	Увеличение надежности
$d_{15}$	Увеличение производительности

Таблица 2.9 — Состав БД

Номер блока	Содержание	Результаты выполнения
1	Правила, определяющие количество ветвей вакуумного агрегата в зависимости от степени вакуума, постоянства газовой нагрузки, ограничений по времени откачки	Количество ветвей вакуумного агрегата
2–12	Правила выбора элементного состава вакуумного агрегата	Элементы вакуумного агрегата
13	Правила выбора способа подключения ветвей к откачиваемому объекту	Способ подключения ветвей к откачиваемому объекту
14	Блок общих правил	Сведения о том, есть ли необходимость дублирования отдельных ветвей и т. п.

Пример синтеза структурной схемы вакуумного агрегата при помощи экспертной системы представлен на рисунке 2.11. Агрегат удовлетворяет следующим требованиям

$$d_1 \wedge \overline{d_2} \wedge \overline{d_3} \wedge d_4 \wedge \overline{d_5} \wedge \overline{d_6} \wedge d_7 \wedge d_8 \wedge d_9 \wedge d_{10} \wedge \overline{d_{11}} \wedge d_{12} \wedge d_{13} \wedge d_{14} \wedge \overline{d_{15}}.$$

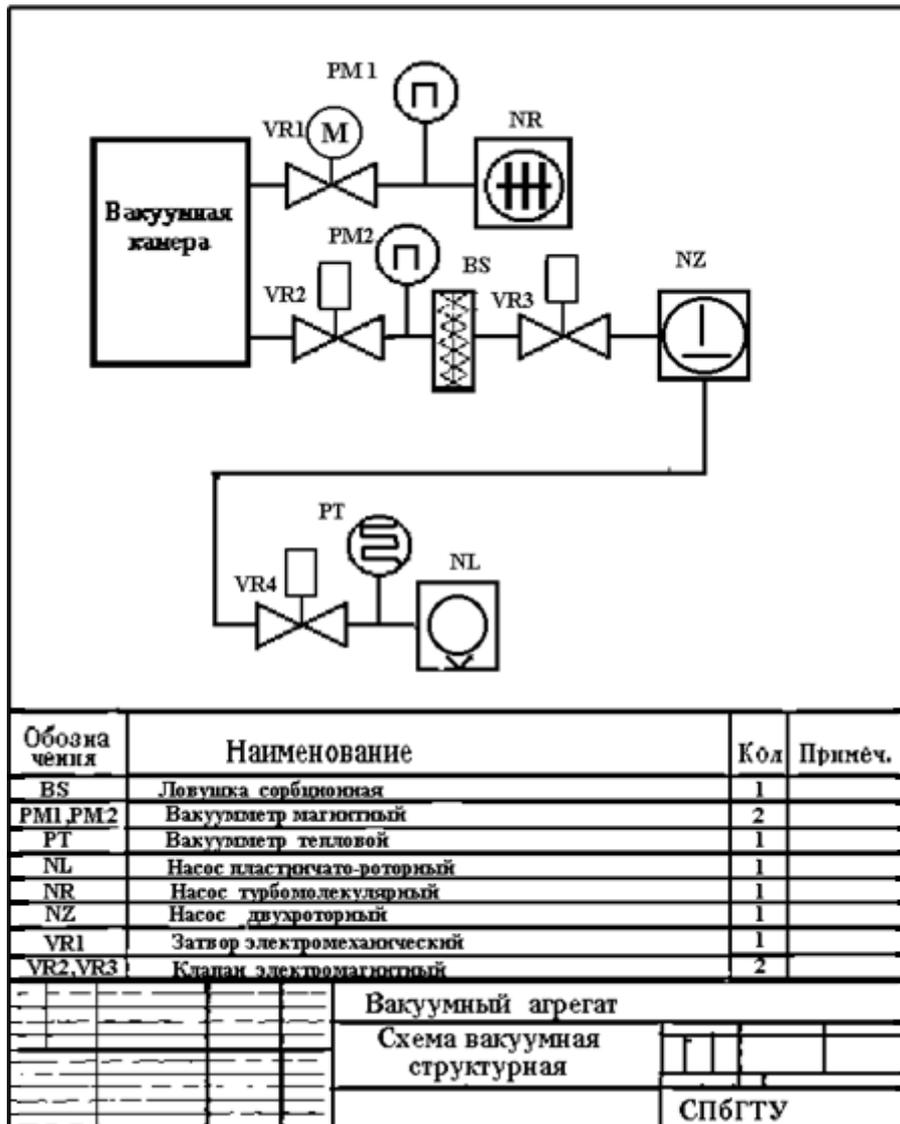


Рисунок 2.11 — Схема вакуумная структурная, полученная методом усечения типового образа

### **Метод наращивания структуры**

Метод наращивания (обогащения) структуры относится к группе методов последовательного синтеза. Суть метода заключается в постепенном наращивании структуры с оценкой промежуточных частичных решений. Наращивание выполняется путем добавления в предыдущую частичную структуру новых элементов. Примером такого алгоритма может служить алгоритм компоновки и размещения оборудования.

Возможность выполнения оценки промежуточных структур является необходимым условием реализации данного подхода. Зачастую такой подход позволяет получить алгоритмы синтеза, экономичные по затратам машинного времени. Однако они оказываются менее точными в смысле получения

наилучшего варианта структуры по сравнению с алгоритмами перебора. Это связано с субъективностью и приближенностью оценки промежуточных структур [10].

### 2.1.3 Параметрический синтез

*Параметрический синтез* решает задачу определения числовых значений параметров технического объекта в целом, а также отдельных его элементов при заданной структуре и условиях работоспособности. Таким образом, параметрическому синтезу предшествует этап структурного синтеза, результатом выполнения которого являются конструктивные решения без указания числовых параметров элементов. Примером параметрического синтеза может служить определение геометрических размеров деталей сборочной единицы.

Параметрический синтез может быть выполнен человеком в интерактивном режиме, и тогда он сводится к многовариантному анализу, или реализован в автоматическом режиме на базе формальных методов оптимизации.

Задача оптимального проектирования состоит в отыскании наилучшего значения целевой функции  $F(X)$  (максимального или минимального в зависимости от вида параметров проектирования) в пространстве управляемых параметров  $X$  технического объекта при заданных функциях-ограничениях  $\varphi(X)$ ,  $\psi(X)$  [10]

$$\begin{aligned} & \text{extr } F(X), \\ & X \in D_X \\ D_X & = \{X \mid \varphi(X) > 0, \psi(X) = 0\}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Как правило, проектируемый объект имеет несколько выходных параметров, каждый из которых может выступать критерием оптимальности, т. е. задача является многокритериальной, в то время как в (2.11) целевая функция одна. В этом случае необходимо многокритериальную задачу сводить к однокритериальной. Достигается это путем введения аддитивных, мультипликативных или минимаксных (максиминных) целевых функций.

Аддитивная целевая функция имеет вид

$$F(X) = \sum_{i=1}^n f_i(X), \quad (2.12)$$

где  $f_i(X)$ ,  $i=1 \dots n$  —  $n$  скалярных целевых функций выходных параметров. Однако применение аддитивной функции требует выражать все локальные целевые функции в одинаковых единицах измерения. В противном случае их приводят к безразмерному виду, поделив на единицу соответствующего масштаба, в качестве которой, например, можно выбрать разность между максимальным  $f_i^M$  и минимальным  $f_i^m$  значениями целевой функции

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \frac{f_i(X) - f_i^m(X)}{f_i^M(X) - f_i^m(X)}. \quad (2.13)$$

Неодинаковая степень важности отдельных параметров компенсируется введением весовых коэффициентов  $\omega_i$

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(X), \quad (2.14)$$

хотя избежать субъективности в оценках таких коэффициентов не удастся.

При использовании аддитивной целевой функции возможна взаимная компенсация частных целевых функций, т. е. слишком низкое значение одного параметра (вплоть до нуля) может быть компенсировано увеличением другого параметра. Для ослабления этого недостатка вводят ограничения на минимальные значения частных целевых функций и их весовых коэффициентов.

Мультипликативная целевая функция имеет те же недостатки

$$F(X) = \prod_{i=1}^n f_i(X). \quad (2.15)$$

Достоинством мультипликативной целевой функции является то, что при ее использовании не требуется нормировка частных целевых функций. В случае неравноценности частных целевых функций также вводятся весовые коэффициенты  $\omega_i$ , и мультипликативная целевая функция принимает вид

$$F(X) = \prod_{i=1}^n f_i^{\omega_i}(X). \quad (2.16)$$

Субъективность суждений по-прежнему остается недостатком.

В основе минимаксной (максиминной) целевой функции лежит идея равномерности. Принцип максимина заключается в таком изменении значений параметров проектирования  $X$ , при котором последовательно увеличиваются те нормированные частные целевые функции, значения которых в исходном решении оказались наименьшими. Вследствие этого «улучшения» частных целевых функций неизбежно происходит снижение значений части остальных частных целевых функций. Принцип максимина формулируется следующим образом: нужно выбрать такое  $x^0 \in X$ , в котором реализуется максимум из минимальных значений частных целевых функций, т. е.

$$F(x^0) = \max_x \min_i (Z_i(X)), \quad (2.17)$$

где  $Z_i(X)$  есть функция, определяющая работоспособность по тому или иному виду (элементу) функционирования.

Примером максиминной постановки является проектирование с обеспечением максимального значения ресурса работы наиболее слабого элемента.

Если частные критерии следует минимизировать, то самым «слабым» критерием является тот, который принимает максимальное значение. Тогда принцип формулируется в виде минимаксной задачи

$$F(x^0) = \min_x \max_i (f_i(X)). \quad (2.18)$$

Выбор вида целевой функции осуществляется проектировщиком.

## 2.2 Геометрическое моделирование

### 2.2.1 Виды геометрических моделей

Практически на всех этапах жизненного цикла технического объекта различные программные модули САПР используют графические изображения — чертежи или трехмерные модели, которые с определенной степенью точности описывают геометрическую форму объекта. Наука, изучающая математические методы описания геометрических свойств реальных или воображаемых объектов, называется *геометрическое моделирование*. Разрабатывая свои собственные методы, геометрическое моделирование опирается на вычислительную математику, аналитическую и дифференциальную геометрию [3, 15].

*Геометрическая модель* содержит информацию о форме объекта и о связях между отдельными элементами объекта. В зависимости от типа, геометрическая модель может содержать также сведения о последовательности и способах моделирования.

В САПР геометрические модели используют при решении множества задач: визуализации проектируемого объекта, расчета инерционных характеристик, кинематического и других видов анализа, различных аспектов конструкторской и технологической подготовки производства.

Компьютерные геометрические модели, используемые в машиностроительных САПР, разделяют на две группы (рисунок 2.12): плоские (двумерные, или 2D, от английского слова dimension — измерение) и объемные (трехмерные, или 3D).

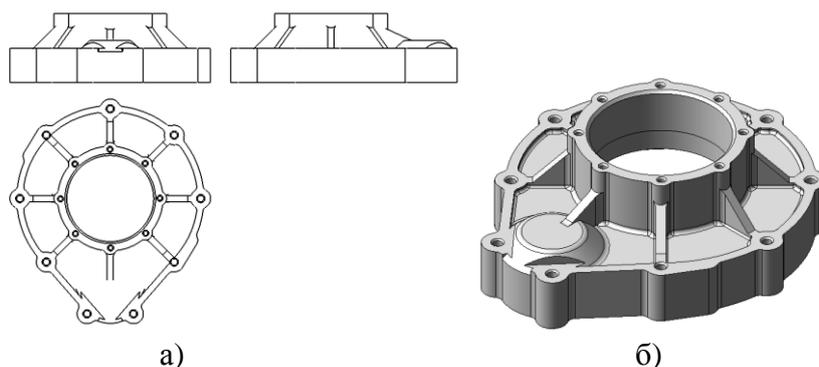


Рисунок 2.12 — Виды геометрических моделей: а) 2D-модель; б) 3D-модель

Основной областью применения двумерной графики является автоматизированная разработка чертежей и других видов конструкторской документации в машиностроительных САПР, схем печатных плат и электрических схем в САПР электронной промышленности и чертежей множества других разновидностей.

В развитых машиностроительных САПР используются оба вида моделей. При этом конструирование изделий начинается, как правило, с построения

трехмерных моделей, на основе которых в интерактивном режиме формируются чертежи с двумерными проекциями, проводятся различные виды анализа (тепловой, прочностной и т. п.), генерируются программы для обработки на станках с ЧПУ.

Геометрическая модель, описывающая форму реально существующего или виртуального объекта, состоит из отдельных элементов — геометрических объектов. В геометрических моделях используются следующие виды геометрических объектов:

- **двумерные** объекты (точки, прямые, отрезки прямых, окружности и их дуги, различные плоские кривые и контуры);
- **трехмерные** объекты:
- **пространственные кривые**;
- **поверхности** (плоскости, поверхности, представленные семейством образующих, поверхности движения, криволинейные поверхности);
- **объемные примитивы** (параллелепипеды, призмы, пирамиды, конусы, произвольные многогранники).

## 2.2.2 Моделирование кривых

### Аналитические кривые

Все линии, участвующие в построении геометрических моделей, называют «кривыми». К **элементарным** кривым относят отрезки прямых, окружностей, дуг и пр. Кривые, описываемые в некоторой локальной системе координат аналитическими функциями, называются **аналитическими**. Аналитическая кривая может быть представлена в параметрической или непараметрической форме (рисунок 2.13).

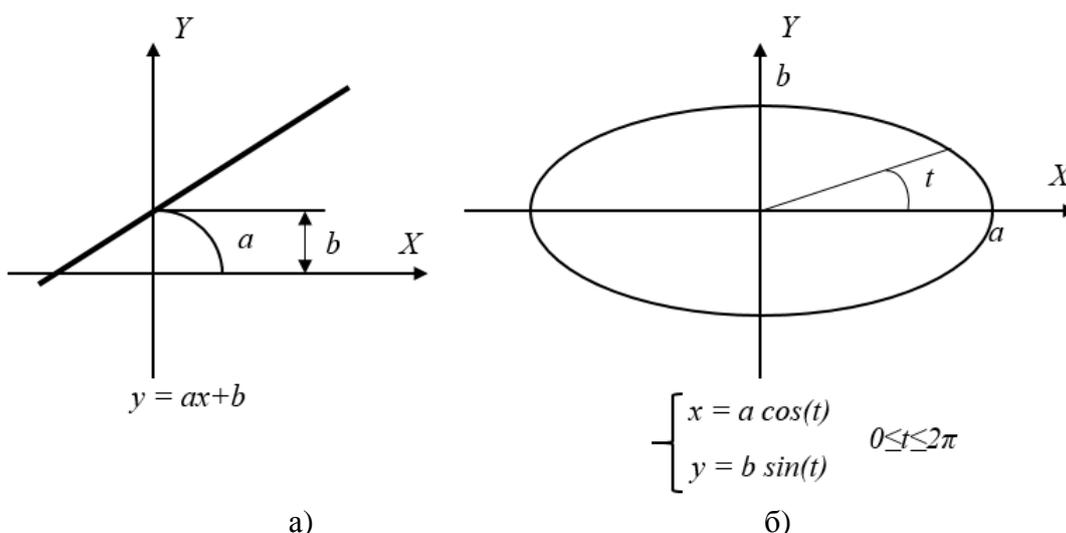


Рисунок 2.13 — Способы моделирования кривых: а) непараметрический; б) параметрический

Координаты точек плоской *непараметрической кривой* представлены функцией вида

$$y = f(x).$$

Координаты точек плоской *параметрической кривой* представляются функциями одного параметра

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t). \end{cases}$$

В этом случае любая точка на кривой описывается вектором

$$P(t) = [x(t), y(t)].$$

Для пространственной параметрической кривой вводится третья координата, и векторное представление принимает вид

$$P(t) = [x(t), y(t), z(t)].$$

### *Линии на базе точек*

Часто приходится сталкиваться с задачами, когда закон построения линии не известен, но необходимо, чтобы кривая проходила через заданные точки и имела определенную степень гладкости. Построение линий этого типа осуществляется по совокупности точек.

Простейшей такой линией можно считать *ломаную* (рисунок 2.14). Она состоит из точек (вершин) и отрезков (звеньев ломаной), последовательно соединяющих заданные точки.

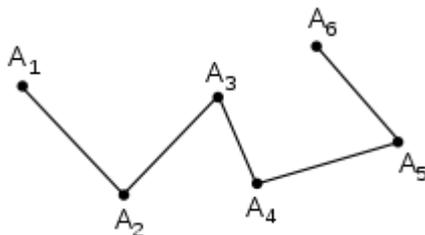


Рисунок 2.14 — Ломаная линия

Если отрезки кривой, проходящей через заданные точки, должны стыковаться гладко (не образовывать петель и резких преломлений, т. е. касательная в соседних точках не должна резко менять своего направления), строится *сплайн*. Само понятие «сплайн» (от англ. spline — гибкое лекало) родом из практического черчения, где сплайном называли гибкую металлическую линейку, используемую для соединения точек на чертеже плавной кривой — графической реализации интерполяции (рисунок 2.15).

Теория интерполяции кривых сплайнами берет свое начало в работе И. Шонберга (I. J. Schoenberg, 1946 г.). Позднее она привела к широкому использованию в геометрическом моделировании неравномерных рациональных В-сплайнов (NURBS), предложенных К. Весприллоем (K. J. Versprille, 1975 г.).

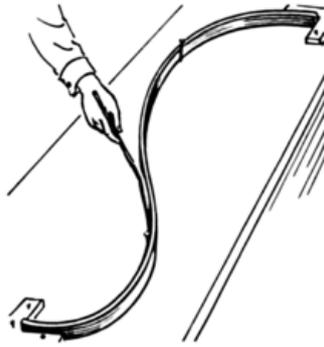


Рисунок 2.15 — Использование гибкой металлической линейки для построения плавной кривой

Наиболее часто, благодаря простоте задания и манипуляции, в компьютерном моделировании применяются «кривые Безье» и NURBS-кривые.

**Кривые Безье** были разработаны в 60-х годах XX века независимо друг от друга Пьером Безье (Pierre Bezier) из автомобилестроительной компании Renault и Полем де Кастельжо (Paul de Casteljaou) из компании Citroen, где применялись для проектирования кузовов автомобилей. Производственная тайна помешала Полю де Кастельжо опубликовать свое открытие, которое было выполнено ранее, чем это сделал его коллега из компании Renault. По иронии судьбы кривые стали носить имя Безье, а именем де Кастельжо назван разработанный им рекурсивный способ определения кривых (алгоритм де Кастельжо).

Кривая (сплайн) Безье задается вершинами многоугольника и в общем случае не проходит через базовые точки (рисунок 2.16). Форма кривой управляется промежуточными точками ( $A_1$  и  $A_2$ ). Кривая Безье (кривая 1) всегда выходит из первой контрольной точки  $A_0$ , касаясь первого отрезка характеристической ломаной (2), соединяющей все контрольные точки, и заканчивается в последней контрольной точке  $A_3$ , касаясь последнего отрезка. При этом любая точка кривой всегда лежит внутри выпуклой оболочки множества контрольных точек.

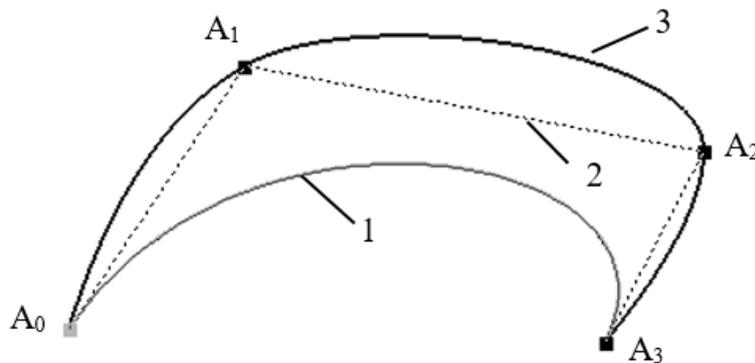


Рисунок 2.16 — Кривая и сплайн Безье: 1 — кривая Безье; 2 — характеристическая ломаная кривой (1); 3 — сплайн на основе кривых Безье

Наибольшее значение имеют кривые Безье второй и третьей степеней (квадратичные и кубические). Но их возможности не позволяют получать кривые сложной формы, поскольку их алгебраическая степень растет вместе с числом контрольных точек. Кривые высших степеней при обработке требуют большего объема вычислений, что весьма затрудняет численные расчеты, и для практических целей используются реже. Для построения сложных по форме линий отдельные кривые Безье невысокого порядка могут быть последовательно соединены друг с другом в сплайн Безье. На рисунке 2.16 для примера показан сплайн на основе кривых Безье (3), координаты вершин которого совпадают с вершинами кривой (2).

Формой кривых Безье можно управлять при помощи буксировщиков (показаны пунктиром на рисунке 2.17).

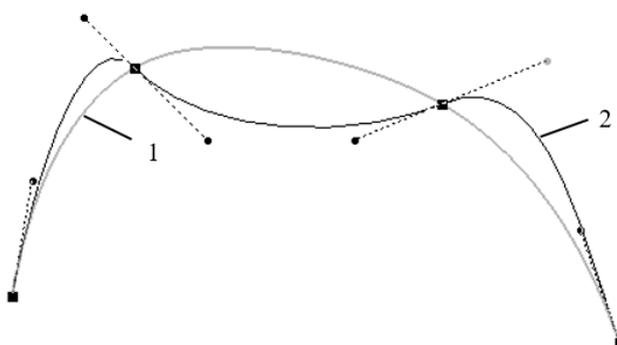


Рисунок 2.17 — Интерактивное управление формой кривой Безье: 1 — исходная кривая; 2 — кривая с измененной формой

Широко используются в САПР кривые *NURBS*. Термин NURBS является аббревиатурой слов Non-Uniform Rational B-spline, где:

— Non-Uniform (неоднородный) означает, что кривая построена на множестве не равноотстоящих узлов. Кривые NURBS не проходят через базовые точки, а усредняют — аппроксимируют их, причем узловые точки могут быть расставлены неравномерно;

— Rational (рациональный) означает, что характеристические точки кривой обладают весами;

— B-spline (basis spline) — базисный сплайн.

Манипуляция контрольными точками и весами NURBS позволяет проектировать большое разнообразие геометрических форм. Геометрический смысл понятия *вес* состоит в следующем: чем больше вес полюса, тем ближе к нему расположена кривая (поверхность), т.е. полюсы с большим весом «притягивают» сплайн сильнее, чем полюсы с маленьким весом. При этом каждая контрольная точка определяет форму только той части кривой, которая находится в ее окрестности, и оказывает меньшее воздействие или вовсе не влияет на форму оставшейся части кривой.

На рисунке 2.18 продемонстрировано изменение формы кривой при изменении величины веса точки  $A_1$  с 1,0 для кривой (1) до 2,0 для кривой (2). Расчеты с NURBS выполняются достаточно быстро и являются численно устойчивыми. Технологии NURBS обладают богатым набором инструментов (вставка/удаление/изменение узла, повышение степени, расщепление), которые могут быть использованы при создании и анализе этих объектов.

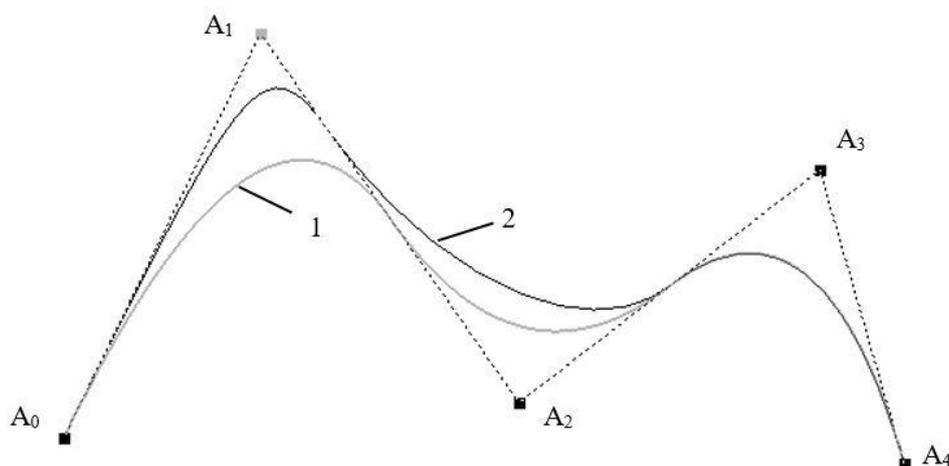


Рисунок 2.18 — Влияние веса контрольных точек на форму кривой

В современных графических пакетах для представления криволинейных форм используются сплайны NURBS, составленные из кривых, порядок которых предоставлено задавать пользователю (рисунок 2.19). Порядок сплайна в случае кривой равен числу, которое на единицу больше максимальной степени полиномов, описывающих участки этой кривой. Однако важно помнить, что увеличение порядка сплайна (в КОМПАС до значений больше 6) на практике редко используется в связи с тем, что это значительно усложняет и, следовательно, замедляет вычисления при операциях с кривыми и поверхностями.

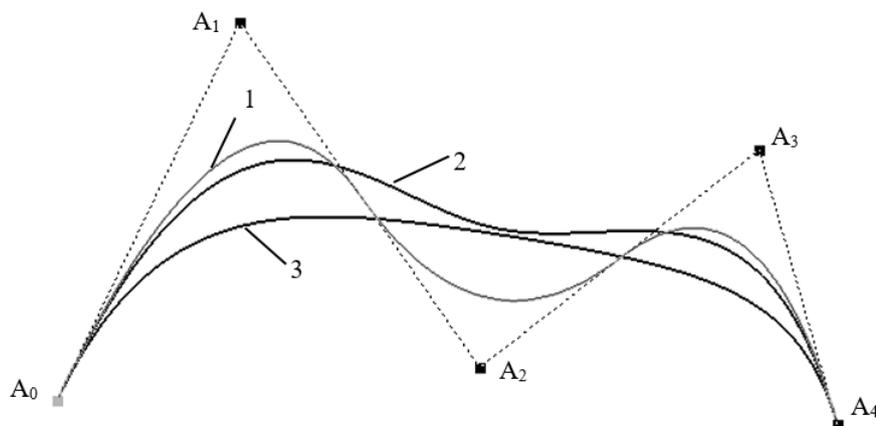


Рисунок 2.19 — Сплайны NURBS: 1 — третьего порядка; 2 — четвертого порядка; 3 — пятого порядка

## ***Линии на базе линий***

Этот тип линий опирается при построении на другие линии. Таким способом могут быть построены усеченная, эквидистантная, репараметризованная и составная кривые.

***Усеченная кривая*** представляет собой часть другой кривой (рисунок 2.20). Усечение производится за счет изменения области определения исходной кривой.

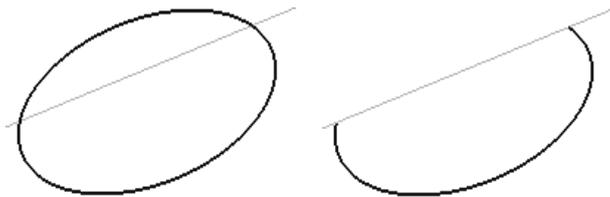


Рисунок 2.20 — Усеченная кривая

***Эквидистантная кривая*** — кривая, каждая точка которой отстоит по нормали от соответствующей точки базовой кривой на одинаковом расстоянии (рисунок 2.21).

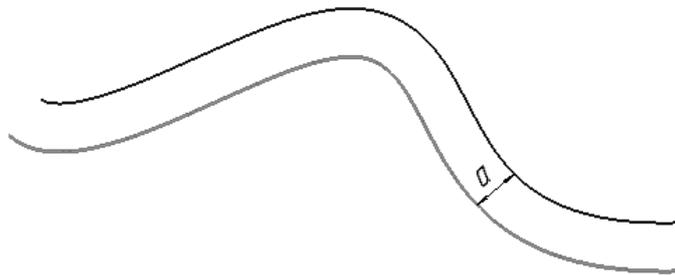


Рисунок 2.21 — Эквидистантная кривая

***Репараметризованная кривая*** — кривая с измененной областью параметра. Например, линия с измененной длиной параметра применяется для согласования областей изменения параметра двух кривых, лежащих в основе кривой пересечения при построении ребер тел.

## ***Составные кривые***

***Составные кривые*** строятся из нескольких кривых (рисунок 2.22). Составная кривая может быть образована как однотипными кривыми, так и кривыми разной природы. Отдельные кривые в составе составной кривой называются *сегментами*.

Все описанные выше кривые могут быть построены как на плоскости, так и в трехмерном пространстве.

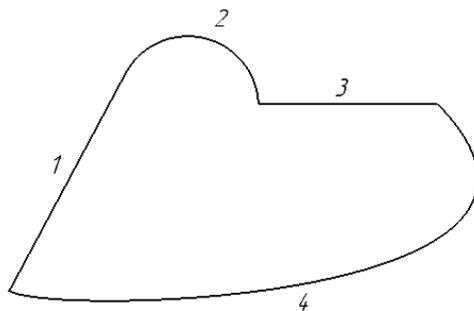


Рисунок 2.22 — Составная кривая, образованная четырьмя сегментами

### ***Линии на базе поверхностей***

К этой группе относят кривые на поверхности, кривые пересечения поверхностей и составные кривые на поверхности. В общем случае эти типы кривых являются пространственными (рисунок 2.23).

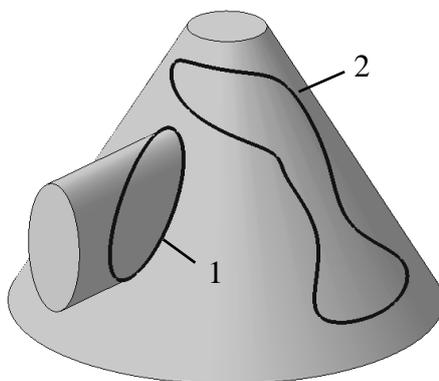


Рисунок 2.23 — Линии на базе поверхностей: 1 — кривая пересечения поверхностей; 2 — кривая на поверхности

### ***Способы построения линий***

Все типы линий, о которых шла речь, по количеству измерений можно разделить на пространственные и двумерные кривые. На базе любой двумерной кривой может быть построена пространственная кривая, поскольку двумерные кривые могут располагаться на произвольной поверхности. По форме они могут совпадать, но будут различаться по структуре данных.

На рисунке 2.24 приведены способы построения пространственных кривых [3]. Составная пространственная кривая может включать как двумерные, так и пространственные сегменты. Направление стрелок в схеме отражает последовательность построения. Построение кривой начинается с моделирования в локальной системе координат аналитических кривых или кривых на базе точек. Затем над ними производятся операции усечения, продления и т. п. Несколько кривых разного вида ложатся в основу составной кривой на поверхности.



Рисунок 2.24 — Способы построения пространственных кривых

Составная пространственная кривая может включать как двумерные, так и пространственные сегменты. Направление стрелок в схеме отражает последовательность построения. Построение кривой начинается с моделирования в локальной системе координат аналитических кривых или кривых на базе точек. Затем над ними производятся операции усечения, продления и т. п. Несколько кривых разного вида ложатся в основу составной кривой на поверхности.

### 2.2.3 Каркасное моделирование

Геометрические модели, при описании которых используются только точки и кривые, называются *каркасными* (рисунок 2.25). Для каждой кривой в каркасной модели известны координаты концевых точек и принадлежность точек ребрам.

Исторически каркасные модели были первым и самым простым способом описания объемной геометрии. Первые САД-системы, использовавшиеся на крупных предприятиях автомобильной и авиационной промышленности с середины 1960-х годов, были двумерными, представляя собой электронный аналог кульмана. Довольно скоро стало ясно, что в центре проектирования должна быть трехмерная модель изделия, двумерные проекции которой могут быть сгенерированы автоматически. Однако простое добавление третьей координаты к традиционным двумерным графическим моделям позволяет смоделировать только каркас изделия, которого недостаточно для вычисления объемно-массовых характеристик будущего изделия.

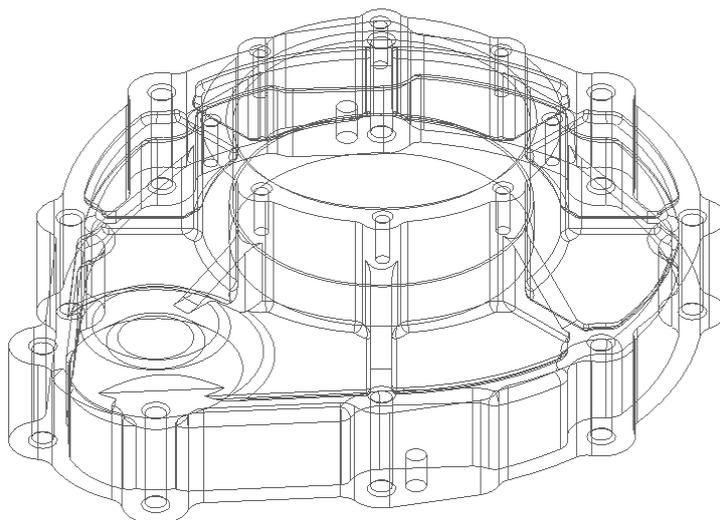


Рисунок 2.25 — Каркасная модель

Такое представление является моделированием самого низкого уровня и имеет ряд серьезных ограничений, которые связаны с недостатком информации о гранях, заключенных между линиями, и невозможности выделить внешнюю и внутреннюю область изображения.

Поскольку модель не содержит информации о гранях, каркасная модель не позволяет:

- формировать однозначное представление ориентации граней и их видимости;
- построить точные сечения;
- вычислить массо-центровочные характеристики;
- сгенерировать сетки для конечно-элементного анализа объектов моделирования;
- использовать средства тонирования изображений, т. к. закрашиванию подвергаются грани, а не ребра.

К достоинствам каркасного моделирования можно отнести то, что такая модель требует гораздо меньше компьютерной памяти и других вычислительных ресурсов. Следует также отметить, что каркасное представление может быть использовано при отображении большого числа моделей в качестве эффективного метода улучшения визуализации. Можно получить каркасные представления объектов, использующих модели твердого тела, и объектов, ограниченных скульптурными поверхностями. На рисунке 2.26 показан наглядный пример каркасного проектирования и визуализации систем коммуникаций производственного цеха с большим парком установленного технологического оборудования.

В некоторых задачах САПР, таких как анализ движения частей технического объекта, каркасной модели бывает вполне достаточно для получения решения.

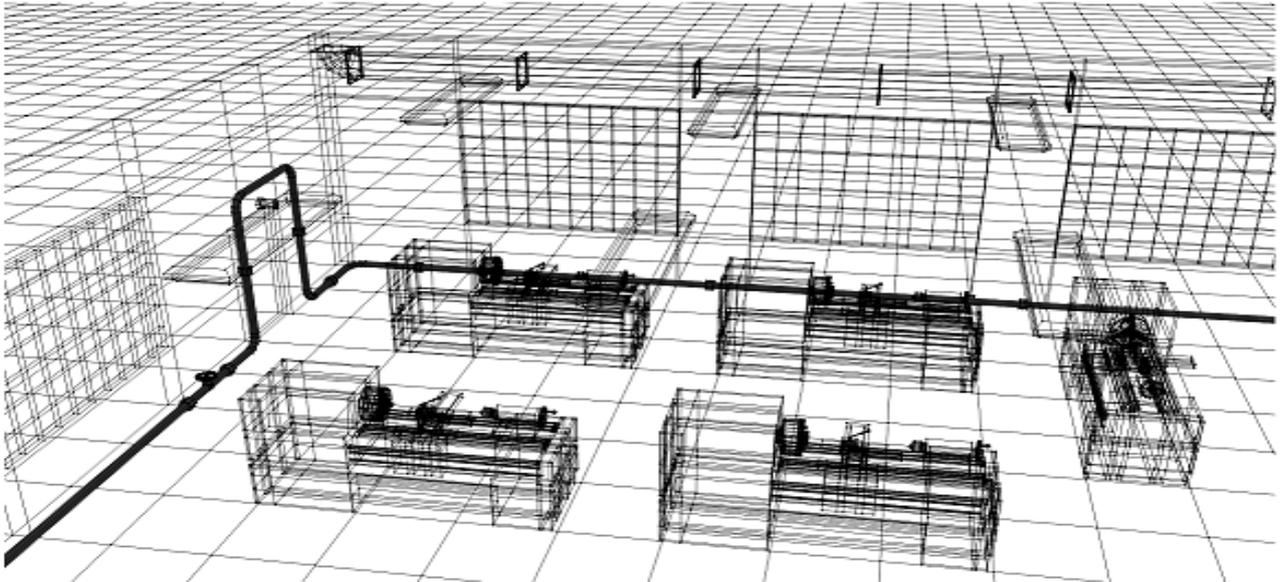


Рисунок 2.26 — Моделирование коммуникаций производственного цеха каркасным методом

### 2.2.4 Моделирование поверхностей

Так же как и линии, поверхности являются математическими абстракциями и используются при описании тел или их отдельных элементов. Основные способы построения поверхностей основаны на использовании аналитических функций (в этом случае мы имеем дело с аналитическими поверхностями) и на манипуляции точками, линиями, и другими поверхностями.

В общем случае параметрически заданная поверхность описывается векторным уравнением  $r = r(u, v)$  двух скалярных аргументов  $u$  и  $v$ , что эквивалентно системе

$$\begin{cases} x = x(u, v) \\ y = y(u, v) \\ z = z(u, v). \end{cases}$$

#### *Аналитические поверхности*

Если координаты радиус-вектора представлены аналитическими функциями двух параметров, то это *аналитические* поверхности (рисунок 2.27) — плоскость, поверхности тора, цилиндра, эллипсоида, параболоида и др.

Функция радиус-вектора произвольной аналитической поверхности описывается следующим образом

$$r(u, v) = p + x(u, v) i_x + y(u, v) i_y + z(u, v) i_z,$$

где  $p$  — точка привязки характерной точки поверхности;  $i_x, i_y, i_z$  — ортогональные векторы единичной длины местной декартовой системы координат;  $x(u, v), y(u, v), z(u, v)$  — функции координат.

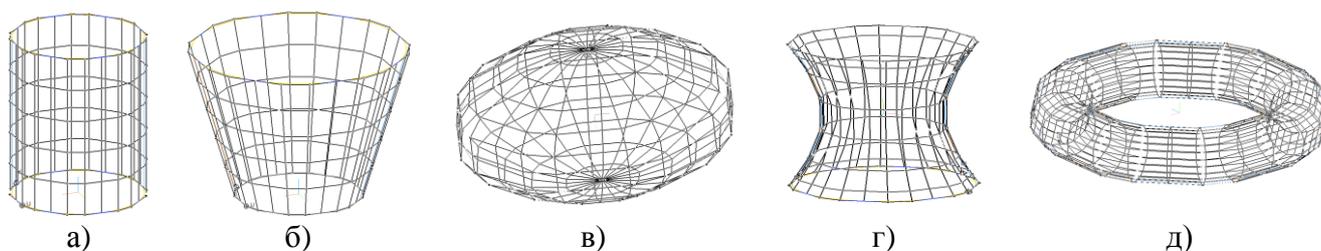


Рисунок 2.27 — Примеры аналитических поверхностей: а) цилиндр; б) конус; в) эллипсоид; г) гиперболоид; д) тор

### **Поверхности движения**

При движении кривой по заданной траектории образуется поверхность **движения**, или **кинематическая** поверхность (от греческого *kinematos* — движение). Кривая, перемещением которой получают поверхность, называется **образующей**. Траектория движения некоторой точки образующей называется **направляющей**.

Различают следующие виды поверхностей движения (рисунок 2.28):

— **поверхность выдавливания** — в качестве направляющей служит отрезок прямой;

— **поверхность вращения** — в качестве направляющей служит дуга окружности или вся окружность;

— **поверхность сдвига** — образующая кинематической поверхности, выполняя движение вдоль направляющей, остается параллельной своему начальному положению;

— **поверхность заметания** — образующая кинематической поверхности выполняет движение, поворачиваясь так, чтобы сохранить ориентацию по нормали к направляющей;

— **линейчатая поверхность** — образующая поверхности движения представляет собой отрезок прямой. В общем случае линейчатая поверхность однозначно определяется тремя линиями — образующей и двумя направляющими.

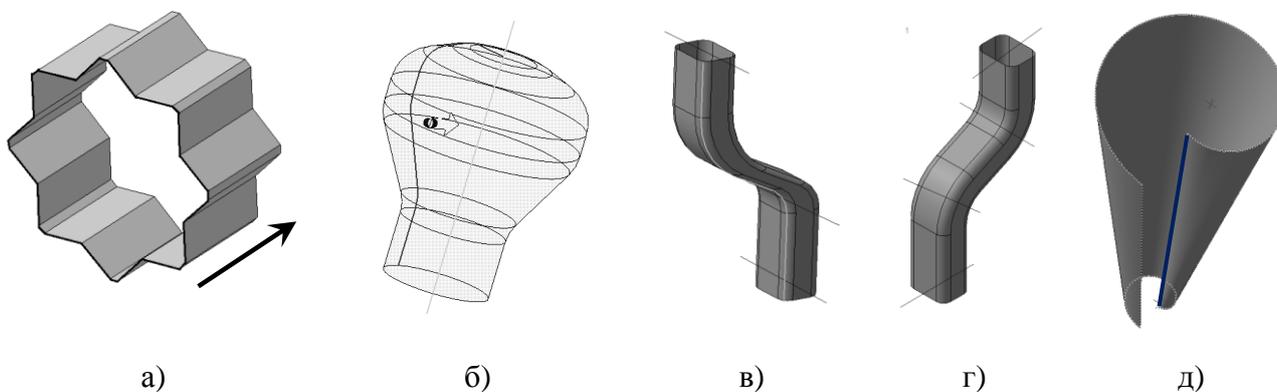


Рисунок 2.28 — Поверхности движения: а) выдавливания; б) вращения; в) сдвига; г) заметания; д) линейчатая

## ***Плоскогранные поверхности***

Поверхность можно смоделировать, используя небольшие плоские элементы. Такие поверхности называют полигональными (плоскогранными), или фасетными. Форма плоских элементов может быть любой, однако на практике чаще применяется аппроксимация простейшими полигонами — треугольниками. В этом случае поверхность называют ***триангулированной***. Такие поверхности легко строятся, для них разработаны эффективные алгоритмы реалистичной визуализации.

Главной проблемой является то, что плоскогранные поверхности всегда представляют модели с определенной степенью погрешности. Чем меньше размер плоских элементов, образующих поверхность, тем меньше искажается форма моделируемого объекта, однако резко увеличиваются вычислительные затраты (рисунок 2.29).

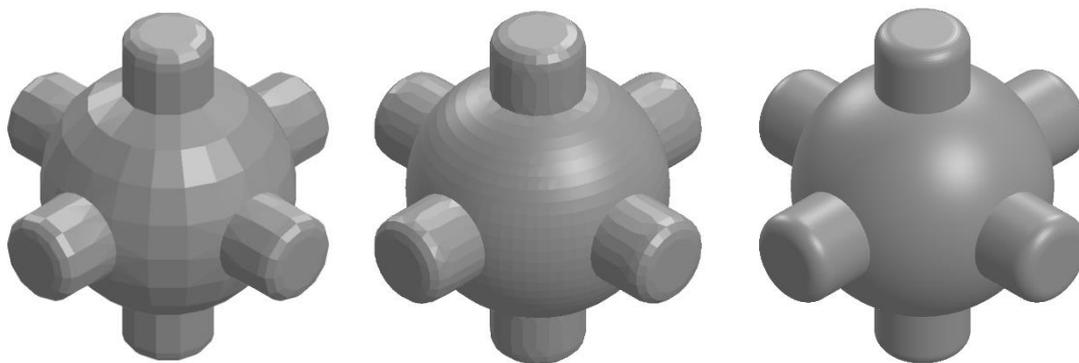


Рисунок 2.29 — Полигональная модель с различными уровнями детализации

## ***Сплайновые поверхности***

Поверхности можно моделировать при помощи семейств взаимно пересекающихся кривых, например, продольных или поперечных сечений корпуса судна, соединенных плавными кривыми (рисунок 2.30). Такие поверхности носят название ***сплайновых***. На практике чаще используется аппроксимация поверхностей сплайнами в форме NURBS (рисунок 2.31). Такое описание поверхности обеспечивает:

- определение координат любой ее точки, радиуса кривизны в ней;
- установление направления нормали к поверхности с высокой, в общем случае, с любой наперед заданной точностью (без учета вычислительных затрат);
- получение точных изображений, спроецированных на плоскость (например, для получения чертежных видов);
- изменение формы поверхности путем перетаскивания контрольных точек.

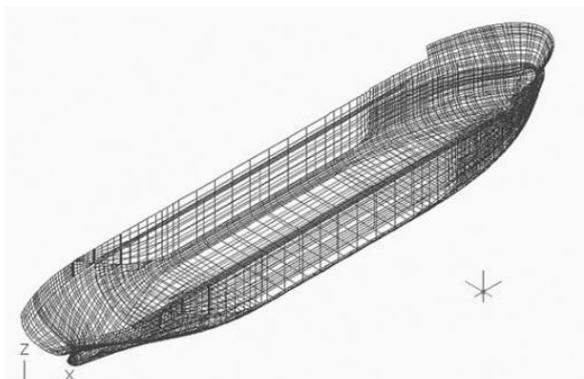


Рисунок 2.30 — Сплайновая поверхность

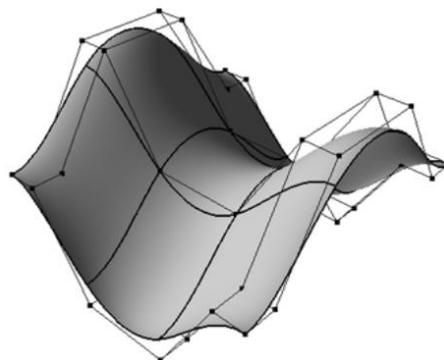


Рисунок 2.31 — NURBS-поверхность

### *Поверхности по облаку точек*

Поверхность любой формы может быть получена интерполяцией или аппроксимацией облака точек, расположенных в пространстве. Для создания облака точек используются 3D-сканеры. Они измеряют большое количество точек на поверхности объекта и передают данные напрямую в приложение САПР или сохраняют в файл данных. На основе этих данных создаются полигональные или сплайновые поверхности (рисунок 2.32). Этот процесс называется «реконструкция поверхности».

При разработке изделий на основе реально существующего прототипа часто используется подход, при котором основные элементы 3D-модели получают обычными средствами твердотельного или поверхностного моделирования, а затем модель дополняют сложными элементами (рельефными или декоративными), полученными путем сканирования оригинала. Эта технология известна под названием *обратный инжиниринг* (реинжиниринг — от англ. reverse engineering). Примером использования реинжиниринга может служить изготовление штамповой оснастки в автомобильной промышленности.



Рисунок 2.32 — Поверхность по облаку точек

## *Эквидистантные поверхности*

По аналогии с аппаратом построения линий, существуют поверхности, построенные на базе других поверхностей. Такими являются *эквидистантные поверхности*, которые получаются смещением на определенное расстояние от существующих граней или поверхностей (рисунок 2.33).

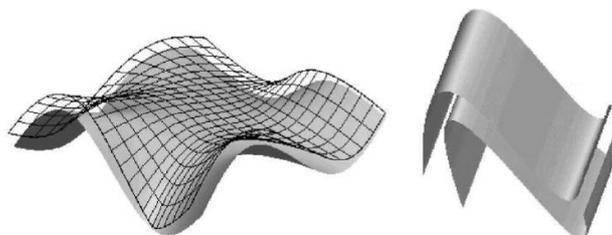


Рисунок 2.33 — Эквидистантные поверхности

### *Особенности поверхностного моделирования*

Моделирование поверхностями позволяет, в отличие от каркасного моделирования, разграничивать внутреннюю и внешнюю части моделируемого объекта за счет создания некоей оболочки, образованной поверхностями. Математическое описание включает в себя не только данные о ребрах и их вершинах, но и уравнения поверхностей, образующих грани, а также сведения о смежности отдельных поверхностей, что необходимо для генерации траектории обрабатывающих инструментов для станков с ЧПУ. Возможности визуализации для поверхностных моделей основаны на способности распознавать грани. Такие модели позволяют получать тоновые изображения, отбрасывание тени и закрывать объекты позади себя.

К ограничениям поверхностных моделей необходимо отнести невозможность вычисления объемов, масс и моментов инерции объектов, а также ограниченность применения булевых операций (вычитания, объединения, пересечения) и сложность процедур удаления скрытых линий и отображения внутренних областей.

#### **2.2.5 Методы представления твердотельных моделей**

В ряде прикладных задач использование аппарата кривых и поверхностей оказывается исчерпывающим, однако в случае, когда необходимо строго разграничивать внутренние и внешние области модели, вычислять массовые характеристики описанного выше аппарата оказывается недостаточно. Этим недостатком лишены твердотельные модели.

*Твердотельная модель* имеет все атрибуты реального физического тела, все размеры таких тел отличны от нуля. Модель твердого тела, помимо описания поверхностей, ограничивающих его, содержит информацию, которая опре-

деляет, находится ли любая точка внутри, вне или лежит на замкнутой граничной поверхности тела. Это позволяет использовать данные об объеме, например, для проведения конечно-элементного анализа.

Преимущества твердотельных моделей:

- последовательность операций при построении твердотельной модели часто отражает последовательность технологических операций в процессе производства объекта;

- создание точной трехмерной компьютерной модели проектируемого изделия с возможностью разграничения внешней и внутренней областей объекта, что необходимо для обнаружения нежелательных взаимовлияний компонентов;

- возможность быстрого формирования чертежей и легкость внесения изменений в проект;

- обеспечение автоматического удаления скрытых линий;

- автоматическое построение трехмерных разрезов, необходимых для анализа сложных сборочных изделий;

- простота разбиения на конечные элементы для дальнейшего инженерного анализа;

- возможность определения объема фигуры и ее массово-инерционных характеристик;

- возможность преобразования в более простые типы моделей — сети и каркасные модели;

- наличие разнообразных цветов, получение тоновых эффектов, манипуляция источником света, что способствует реализации качественных изображений форм, компонентов и сечений;

- повышение эффективности имитации динамики механизмов, процедур генерации траектории движения инструмента, функционирования роботов.

Основными недостатками твердотельного моделирования являются:

- высокие требования к производительности аппаратных средств;

- высокие требования к квалификации персонала;

- значительная стоимость таких систем.

В процессе развития систем твердотельного моделирования использовались разные подходы к формированию математической модели, описывающей проектируемые объекты. Сегодня на практике чаще всего применяются методы *граничного* и *конструктивного* представлений твердых тел.

### ***Метод конструктивной геометрии***

В методе конструктивной геометрии (другие названия — *constructive solid geometry*, CSG, или *constructive representation*, C-rep) модели представляются комбинацией элементарных твердых тел — цилиндров, конусов, призм, сфер и т. п.

Согласно С-гер, любое тело может быть построено из твердотельных примитивов или составных тел при помощи булевых операций (рисунки 2.34, 2.35). Как правило, используются булевы операции — разность, объединение и пересечение. Такое представление позволяет удобно модифицировать твердотельную модель, изменяя определение исходных примитивов — их размеры, ориентацию и точку привязки.

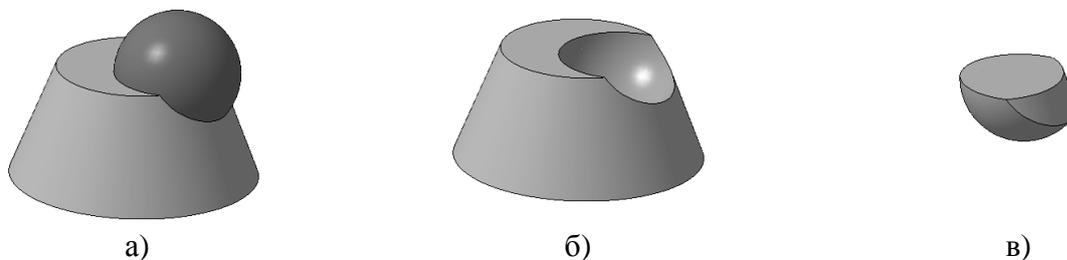


Рисунок 2.34 — Операции на конструктивной геометрии: а) булево объединение; б) булева разность; в) булево пересечение

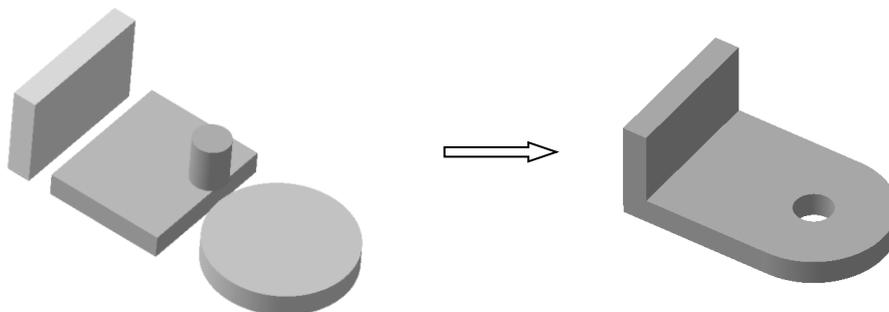


Рисунок 2.35 — Построение твердого тела из конструктивных примитивов

Преимущества метода конструктивной геометрии:

- простая структура данных и, как следствие, простое управление ими;
- тело всегда является корректным (внутренний объем однозначно отделен от внешнего);
- возможность преобразования в В-гер представление (С-гер тела могут после преобразования быть использованы в прикладных программах, использующих В-гер представление);
- простота реализации параметрического моделирования за счет изменения параметров исходных элементарных тел.

Недостатки метода конструктивной геометрии:

- ограничения при моделировании объектов сложных форм, поскольку ограничен набор исходных примитивов и набор инструментов для манипуляции ими;
- для того чтобы получить информацию о граничных поверхностях построенного тела (которая необходима во многих приложениях, например, для программирования станков с ЧПУ), необходимо выполнить большой объем вычислений.

## Метод граничного представления

Согласно методу граничного представления (от англ. Boundary representation, B-rep), тела описываются связанными друг с другом поверхностями, образующими «водонепроницаемую» границу между телом и пространством вокруг него (рисунок 2.36). Топология модели при этом задается связями между отдельными граничными элементами — вершинами и ребрами, ребрами и гранями, а также информацией о принадлежности каждой точки внутренней или внешней части тела. Геометрия тела определяется параметрическими свойствами граничных элементов. Геометрические данные для каждого граничного элемента свои: для вершины — ее координаты, для ребра — параметрическое уравнение пространственной кривой (чаще всего в виде NURBS), для грани — параметрическое уравнение поверхности (опять же часто в виде NURBS).

На рисунке 2.37 и в таблицах 2.10–2.12 представлен пример простой структуры данных для граничного представления тела.

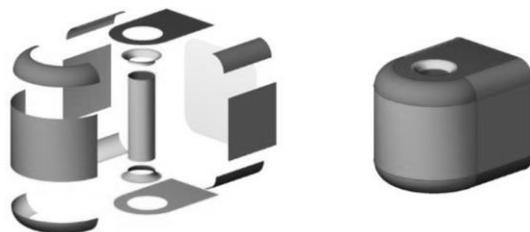


Рисунок 2.36 — Граничное представление твердого тела

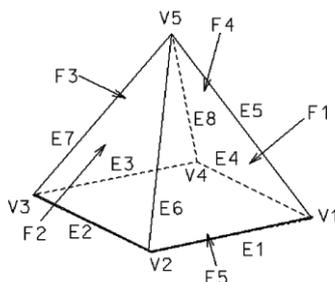


Рисунок 2.37 — Структура данных B-rep

Таблица 2.10 — Таблица граней

Грань	F1	F2	F3	F4	F5
Ребра	E1, E5, E6	E2, E6, E7	E3, E7, E8	E4, E8, E5	E1, E2, E3, E4

Таблица 2.11 — Таблица ребер

Ребро	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Вершины	V1, V2	V2, V3	V3, V4	V4, V1	V1, V5	V2, V5	V3, V5	V4, V5

Таблица 2.12 — Таблица вершин

Вершина	V1	V2	V3	V4	V5
Координаты	$x_1, y_1, z_1$	$x_2, y_2, z_2$	$x_3, y_2, z_3$	$x_4, y_4, z_4$	$x_5, y_5, z_5$

В таблице 2.10 для каждой грани задан перечень ограничивающих ребер. Соблюдается правило о последовательности перечисления ребер: против часовой стрелки, если смотреть на тело с внешней стороны. Это правило позволяет получать информацию о том, расположена ли точка внутри тела или снаружи. Таблица ребер (таблица 2.11) связывает ребра и вершины каждого ребра. Координаты вершин (в системе координат тела) приводятся в таблице вершин (таблица 2.12).

Описанная структура соответствует телам, имеющим плоские грани. Для тел, грани которых являются криволинейными, необходимо несколько изменить соответствующие строки таблицы граней и ребер — они дополняются уравнениями поверхностей и кривых.

Система с В-гер представлением хранит точное описание границ модели любой сложности. Тела, описанные в В-гер, требуют больше памяти, но меньше вычислений для создания изображения, в отличие от С-гер, где требуется меньше памяти, но больше объем вычислений при воспроизведении и отображении модели. При необходимости, структура В-гер легко преобразуется к каркасному представлению — нужно лишь исключить из ее описания таблицу граней.

### ***Инструменты создания твердотельных моделей***

Создание твердотельной модели возможно несколькими способами: использованием основных формообразующих операций, к которым относятся выдавливание, вращение, операция по сечениям, кинематическая операция (названия операций могут отличаться в различных САПР, однако идеология построения сохраняется), а также приданием толщины поверхности и построением листового тела.

Все формообразующие операции строят тело при помощи перемещения сечения в пространстве, след от которого определяет форму элемента. В качестве сечения в разных ситуациях могут быть использованы ребро, кривая, эскиз, грань или поверхность.

Эскизом называется объект трехмерного моделирования, созданный стандартными средствами построения плоских изображений (средствами чертежно-графического редактора). Эскиз может располагаться в одной из ортогональных плоскостей координат, на плоской грани существующего тела или во вспомогательной плоскости, положение которой задано пользователем.

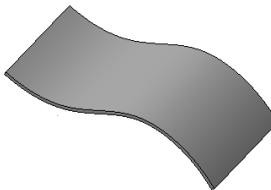
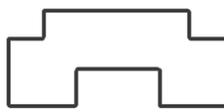
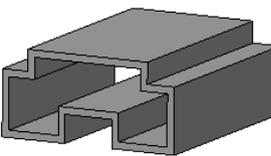
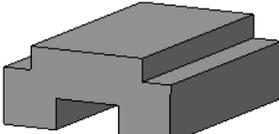
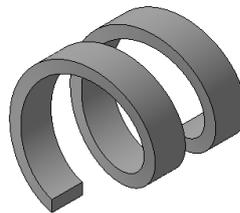
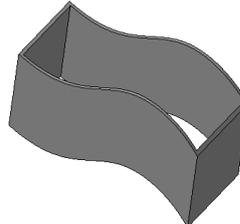
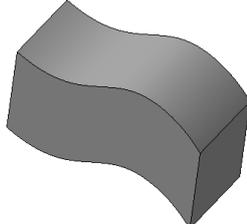
Эскизы используются для разных целей, например:

- задание формы сечения тела или поверхности;
- задание траектории перемещения сечения;
- задание положения экземпляров массива.

Эскиз изображается на плоскости. Один и тот же эскиз может использоваться в нескольких различных операциях.

Формообразование тела, при котором сечение перемещается вдоль прямолинейной траектории, называется **выдавливанием**. Сечением может служить плоская замкнутая или разомкнутая кривая (в т. ч. уже существующее в модели ребро), грань или произвольная поверхность, пространственная кривая. В зависимости от вида эскиза результатом выполнения операции выдавливания может быть сплошной и (или) тонкостенный элемент (таблица 2.13).

Таблица 2.13 — Операция выдавливания

Вид сечения		Тонкостенный элемент	Сплошной элемент
Плоская разомкнутая кривая			—
Плоская замкнутая кривая			
Пространственная кривая			—
Поверхность, грань			

Операция **вращения** формирует тело путем поворота сечения вокруг оси на требуемый угол. В качестве сечения может быть грань, поверхность, разомкнутая или замкнутая плоская кривая, пространственная кривая. В зависимости от вида эскиза результатом выполнения операции вращения может быть сплошной и (или) тонкостенный элемент, сфероид и (или) тороид. Некоторые варианты формы тел вращения приведены в таблице 2.14.

**Кинематическая** операция образует тело путем перемещения сечения вдоль произвольной траектории. При этом его ориентация может меняться или оставаться постоянной. Основные типы кинематических тел — с сохранением угла наклона эскиза относительно траектории, параллельно самому себе и ортогонально траектории — представлены на рисунке 2.38.

Таблица 2.14 — Операция вращения

Вид сечения		Тонкостенный элемент	Сплошной элемент
Плоская разомкнутая или замкнутая кривая			
Пространственная кривая			—
Поверхность, грань			

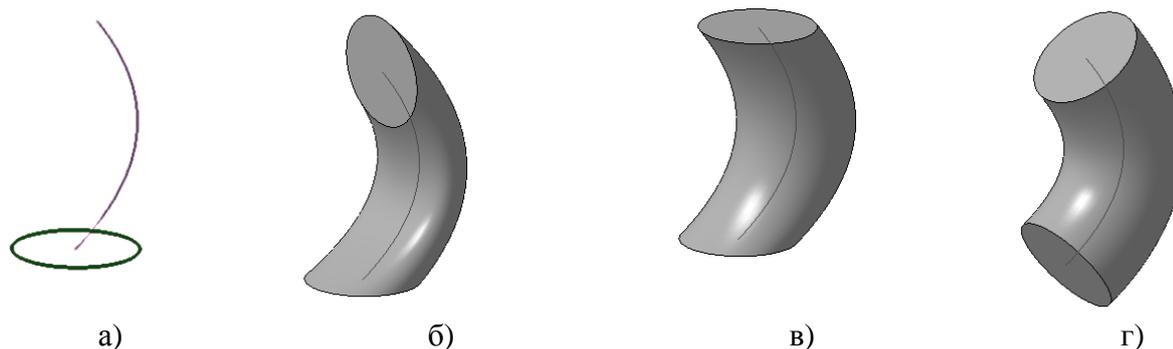


Рисунок 2.38 — Кинематические тела, получаемые при движении сечения вдоль траектории: а) эскизы сечения и траектории; б) движение с сохранением угла наклона; в) параллельно самому себе; г) ортогонально траектории

Построение тела **по сечениям** происходит путем последовательного соединения нескольких сечений. Если топология сечений одинакова, то траектория соединения сечений либо строится автоматически, либо путь указывает пользователь (рисунок 2.39).

При построении элемента по сечениям может быть использована заранее заданная траектория (рисунок 2.40).

Помимо основных формообразующих операций к созданию твердотельных моделей приводят также операции **листовое тело** (рисунок 2.41) и **придание толщины**, которая образует тело путем добавления слоя материала на указанную поверхность (рисунок 2.42). При помощи этой команды возможно преобразование модели, полученной средствами поверхностного моделирования в твердотельную модель.

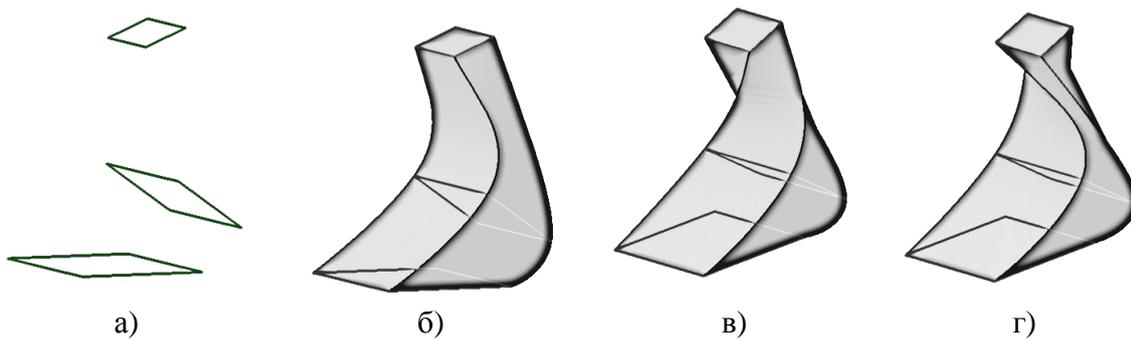


Рисунок 2.39 — Операция по сечениям: а) эскизы сечений; б) автоматическое соединение сечений; в, г) соединение вершин сечений в произвольной последовательности

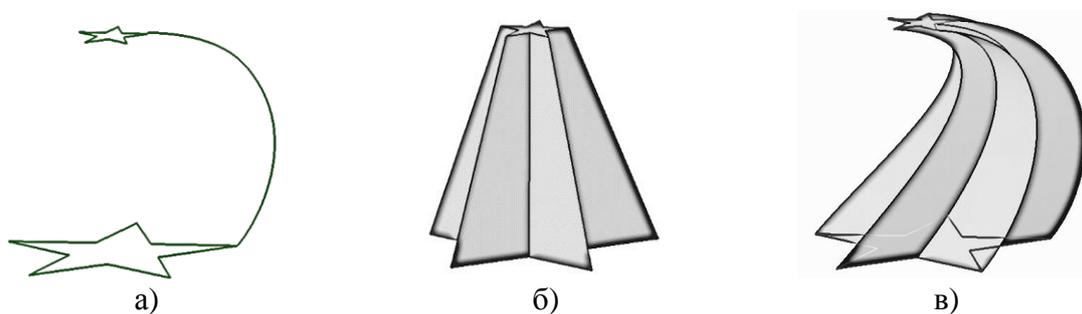


Рисунок 2.40 — Операция по сечениям: а) эскизы сечений и траектории; б) автоматическое соединение сечений без указания траектории; в) соединение сечений по траектории

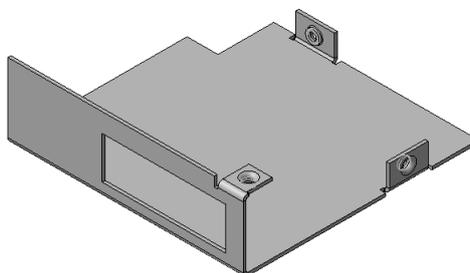


Рисунок 2.41 — Листовое тело

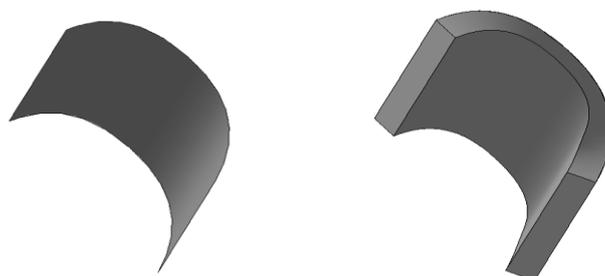


Рисунок 2.42 — Придание толщины поверхности

В процессе формирования модели участвуют также такие элементы как фаски, скругления, ребра жесткости, создание оболочки и др. Их относят к операциям редактирования тел.

## 2.3 Параметризация геометрических моделей

Одна из основных задач, которую призваны решать САПР — сокращение сроков проектирования изделий. Эффективность ее решения зависит от автоматизации построения модели и возможностей упрощения этого процесса.

Если в процессе создания геометрических моделей предусмотреть возможность быстрого изменения геометрии (изменение размеров отдельных элементов, взаимное изменение размеров и расположения элементов, наличие и отсутствие определенных элементов в модели, взаимное расположение моделей в сборке), то процесс создания новых моделей на базе уже имеющихся существенно упростится, что создаст условия для быстрого поиска наиболее эффективного решения. Модели, которые могут в дальнейшем целенаправленно изменяться, называются *параметрическими*.

Не всегда использование параметрических моделей оправдано. Так, задачи автоматизации разработки конструкторско-технологической документации, которая не связана ассоциативно с трехмерными моделями, зачастую удобнее решать, используя непараметрические модели. Исключением являются, например, чертежи деталей, при модификации которых изменяются только размеры и не меняется топология.

Для того чтобы модель можно было легко изменять, в процессе ее первоначального создания необходимо связать требуемые параметры геометрических объектов и наложить ограничения на определенные элементы модели.

Параметрическая идеология обеспечивает прямое взаимодействие модулей Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Manufacturing (CAM) и Computer-Aided Engineering (CAE) и сквозную параметризацию, осуществляя тем самым идею прямого превращения конструкторской модели в деталь. Изменение исходной параметрической модели детали, полученной на этапе конструирования, приводит к автоматическому изменению рассчитанной траектории обработки и полученной по данной траектории управляющей программы.

Параметрическое моделирование имеет следующие преимущества:

- многократное использование модели или чертежа с возможностью изменения его параметров;
- высокую степень автоматизации многих проектных операций;
- ассоциативность моделей, означающая, что любое изменение параметров одной детали приводит к автоматическому перестроению всех связанных с ней элементов: сборочных узлов, рабочих чертежей, управляющих программ для станков с ЧПУ и т. д.;
- простоту разработки и интеграции в состав комплекса прикладных расчетно-аналитических моделей, значительно расширяющих его функциональные возможности;
- высокую степень безошибочности принимаемых проектных решений.

В САПР применяется несколько технологий, использующих методологию параметрического моделирования.

### 2.3.1 Табличная параметризация

Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей. Создание нового экземпляра детали производится путем выбора из таблицы типоразмеров. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно.

Тем не менее, табличная параметризация широко применяется во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования (рисунки 2.43, 2.44).

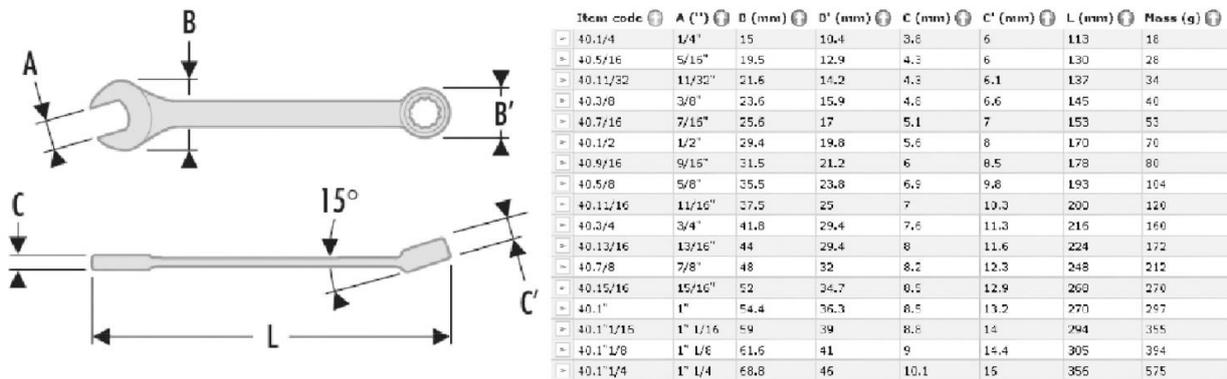


Рисунок 2.43 — Табличная параметрическая модель гаечного ключа

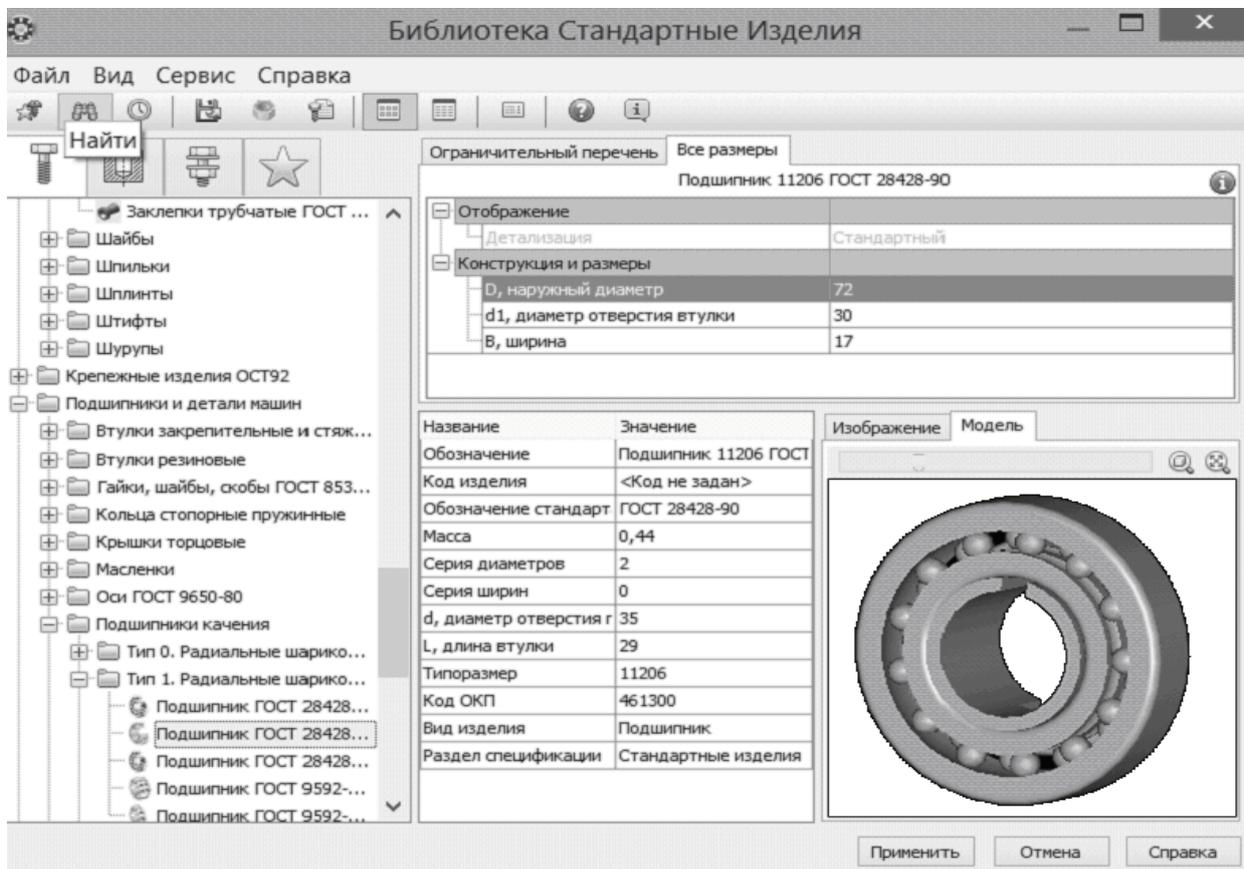


Рисунок 2.44 — Библиотека стандартных изделий в САПР КОМПАС-3D

При использовании библиотек и баз данных, содержащих готовые геометрические модели, конструктор выбирает из базы заготовку и задает необходимые размеры непосредственно перед вставкой в документ.

### 2.3.2 Вариационная параметризация

В различных источниках этот вид параметризации может называться также эскизным, или размерным.

Вариационная, или размерная, параметризация основана на построении геометрических объектов во фрагментах, чертежах и эскизах с наложением в любом порядке на объекты различных параметрических связей (взаимосвязей) и ограничений, в том числе в виде системы уравнений, определяющих зависимости между параметрами. Наложение связей и ограничений возможно в любой последовательности и никак не связано с порядком построения геометрических объектов [9, 23].

**Взаимосвязь** объектов подразумевает зависимость между параметрами нескольких объектов. Редактирование одного из взаимосвязанных параметров влечет за собой изменение других. Редактирование параметров одного объекта, не связанных с параметрами других объектов, не влияет ни на какие параметры. При удалении одного или нескольких объектов взаимосвязь исчезает.

В качестве примеров связей, наложенных на объекты, можно привести параллельность и перпендикулярность отрезков, прямых, стрелок взгляда, сегментов линии ступенчатого разреза, равенство длин отрезков или радиусов окружностей. Взаимозависимыми параметрами параллельных отрезков являются углы их наклона, т.к. параллельность отрезков тождественна равенству углов их наклона. Если повернуть один из связанных таким образом отрезков, т. е. изменить угол его наклона, повернется и другой отрезок. Если сдвинуть или изменить длину одного из отрезков, не изменяя его угол наклона, второй отрезок не изменится. Если удалить один из отрезков, то угол наклона другого станет независимым.

Зависимость между параметрами может быть и более сложной, чем равенство одного параметра другому. Например, возможно задание функции, определяющей отношение между параметрами нескольких объектов.

Второй тип параметрической связи — **ассоциативность** объектов. Ассоциативными могут быть объекты, которые при построении привязываются к другим объектам — размеры, технологические обозначения, штриховки. Такие объекты «помнят» о своей принадлежности к базовому графическому объекту (отрезку, окружности и т. д.) или к нескольким объектам. При редактировании базовых объектов (например, их сдвиге или повороте) ассоциативные объекты перестраиваются соответствующим образом. В результате сохраняется взаимное расположение базового и ассоциированного с ним объекта.

Под **ограничением** подразумевается зависимость между параметрами отдельного объекта или равенство параметра объекта константе. Допускается

только такое редактирование объекта, в результате которого не будут нарушены установленные зависимости.

В качестве примеров ограничений, наложенных на геометрические объекты, можно привести вертикальность и горизонтальность отрезков, прямых, стрелок взгляда, линий разреза/сечения. Вертикальность отрезка тождественна равенству X-координат его концов друг другу или равенству угла его наклона  $90^\circ$ . Отрезок, на который наложено такое ограничение, можно перемещать, но нельзя поворачивать, т. е. изменять угол его наклона.

На рисунке 2.45 приведен пример вариационной параметризации кривошипно-шатунного механизма, а на рисунке 2.46 — модель имитации его движения.

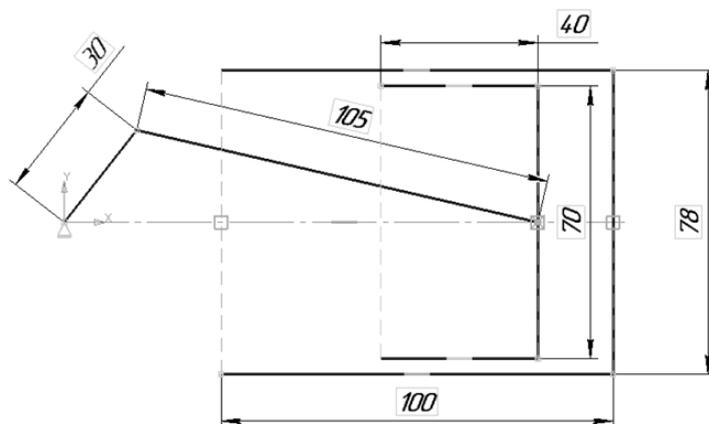


Рисунок 2.45 — Вариационная параметризация кривошипно-шатунного механизма

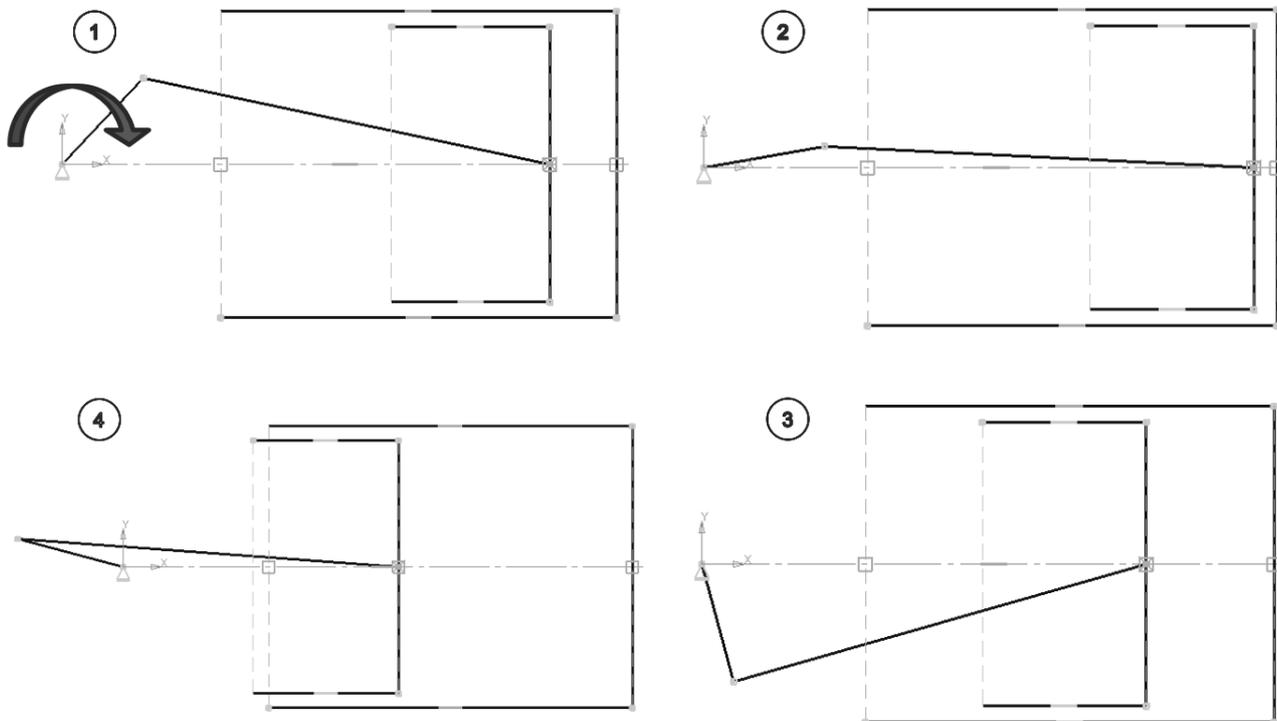


Рисунок 2.46 — Имитация движения кривошипно-шатунного механизма

Ниже представлен список связей и ограничений, которые, как правило, используются в САПР для создания плоских параметрических моделей:

- вертикальность объектов;
- горизонтальность объектов;
- коллинеарность отрезков;
- параллельность объектов;
- перпендикулярность объектов;
- выравнивание характерных точек объектов по вертикали;
- выравнивание характерных точек объектов по горизонтали;
- зеркальная симметрия;
- расположение объекта на биссектрисе угла;
- равенство радиусов дуг и окружностей;
- равенство длин отрезков;
- касание кривых;
- объединение характерных точек объектов;
- принадлежность точки кривой;
- расположение точки на середине кривой;
- фиксация характерных точек объектов;
- фиксация длины;
- фиксация угла;
- фиксация размера и редактирование его значения;
- присвоение размеру имени переменной.

При редактировании параметризованных и ассоциативных объектов перестроение изображения происходит таким образом, что соблюдаются все наложенные на объекты ограничения и сохраняются связи между объектами. Ряд ограничений и связей может быть определен без явного ввода числовых значений (например, горизонтальность прямой или условие касания двух кривых). Напротив, такие ограничения, как значения размеров, должны выражаться именно числовыми значениями.

Некоторые связи и ограничения можно задать в форме выражения (например, указать функцию зависимости параметра объекта от параметров других объектов). Задание аналитических зависимостей между параметрами отдельных геометрических объектов является наиболее сложным этапом построения параметрической модели. Однако именно такой уровень параметризации позволяет получить наибольший эффект от использования параметрических моделей.

Последовательность действий при создании параметрической модели с использованием вариационной параметризации следующая:

1) создается эскиз (профиль) для трехмерной операции. На эскиз накладываются необходимые параметрические связи (рисунок 2.47);

2) эскиз «образмеривается». На этом этапе отдельные размеры можно обозначить как переменные, присвоив им имена, и задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул;

3) производится трехмерная операция. Значение атрибута (атрибутов) операции тоже служит параметром. В данном случае — величина выдавливания (рисунок 2.48).

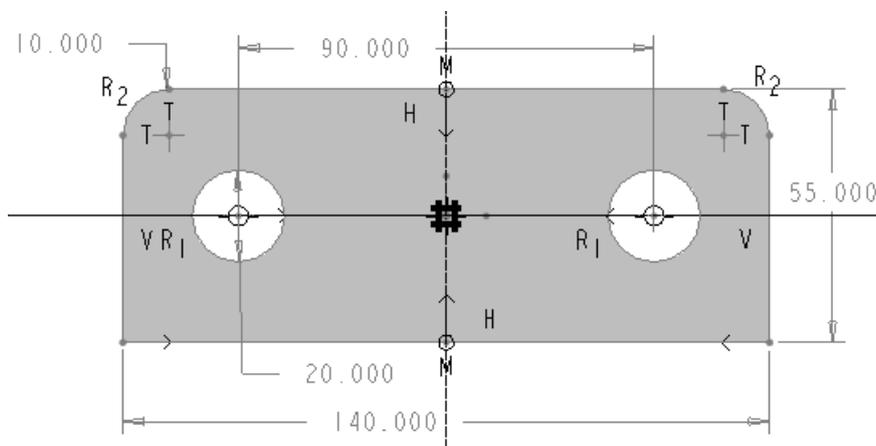


Рисунок 2.47 — Эскиз с вариационной параметризацией: на вертикальные и горизонтальные линии наложены ограничения (V и H), равенство дуг и окружностей (R1 и R2)

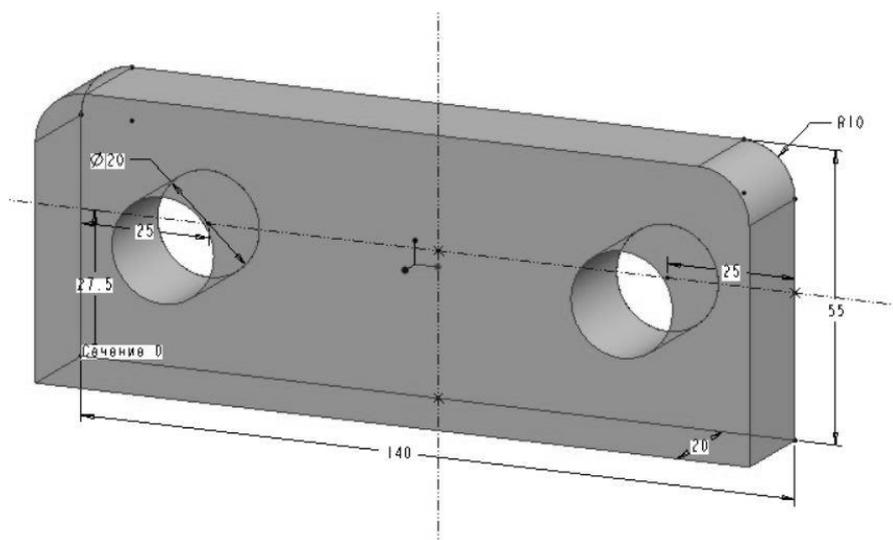


Рисунок 2.48 — Геометрическая модель с вариационной параметризацией

Вариационная параметризация позволяет легко изменять форму эскиза или величину параметров операций, что позволяет удобно модифицировать трехмерную модель.

### 2.3.3 Иерархическая параметризация

Для этого типа параметризации определяющее значение имеет порядок создания объектов, точнее, порядок их подчинения друг другу — иерархия.

Рассмотрим подробнее, что понимается под иерархией объектов. Для создания любого объекта модели используются уже существующие объекты (например, для создания эскиза нужна плоскость или грань, для создания фас-

ки — ребро и т. д.). Объект, для создания которого использовались любые элементы и (или) характеристики другого объекта, считается подчиненным этому объекту.

Например, эскиз построен на грани основания — эскиз подчиняется основанию. В эскизе есть проекции ребер приклеенного формообразующего элемента — эскиз подчиняется этому элементу. Вырезанный формообразующий элемент построен путем операции над эскизом — элемент подчиняется эскизу. При приклеивании формообразующего элемента глубина его выдавливания задавалась до вершины элемента вращения — элемент выдавливания подчиняется элементу вращения. Фаска построена на ребре кинематического элемента — фаска подчиняется кинематическому элементу. Вспомогательная ось проведена через вершины формообразующих элементов — ось подчиняется этим элементам. Вспомогательная плоскость проведена через ось перпендикулярно грани формообразующего элемента — плоскость подчиняется оси и формообразующему элементу. И так далее.

Вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «дерева построения». В нем перечислены все существующие в модели вспомогательные элементы, эскизы и выполненные операции в порядке их создания. Помимо «дерева построения» модели, система запоминает иерархию ее элементов (отношения между элементами).

К иерархическим параметрическим связям объектов относят:

- принадлежность эскиза плоскости или плоской грани;
- тип формообразующего элемента или поверхности, построенного на основе эскиза;
- существование в эскизе проекции объекта (ребра, грани и т. п.);
- связь вспомогательной оси или плоскости с базовыми объектами;
- автоматическое определение глубины выдавливания формообразующего элемента;
- соответствие всех параметров массивов (по сетке, вдоль кривой и т. д.) параметрам исходных элементов;
- принадлежность круглого отверстия грани;
- участие определенных ребер и вершин в образовании фаски, скругления и т. п.;
- отсечение части модели плоскостью или поверхностью;
- участие определенных деталей в булевых операциях (объединение и вычитание) и т. д.

Параметризация на основе истории построений присутствует практически во всех САПР, использующих трехмерное твердотельное параметрическое моделирование. Обычно такой тип параметрического моделирования сочетается с *вариационной* параметризацией (п. 2.3.2). На рисунке 2.49 показан пример геометрической модели зубчатого передаточного вала с иерархическим деревом построений в КОМПАС-3D.

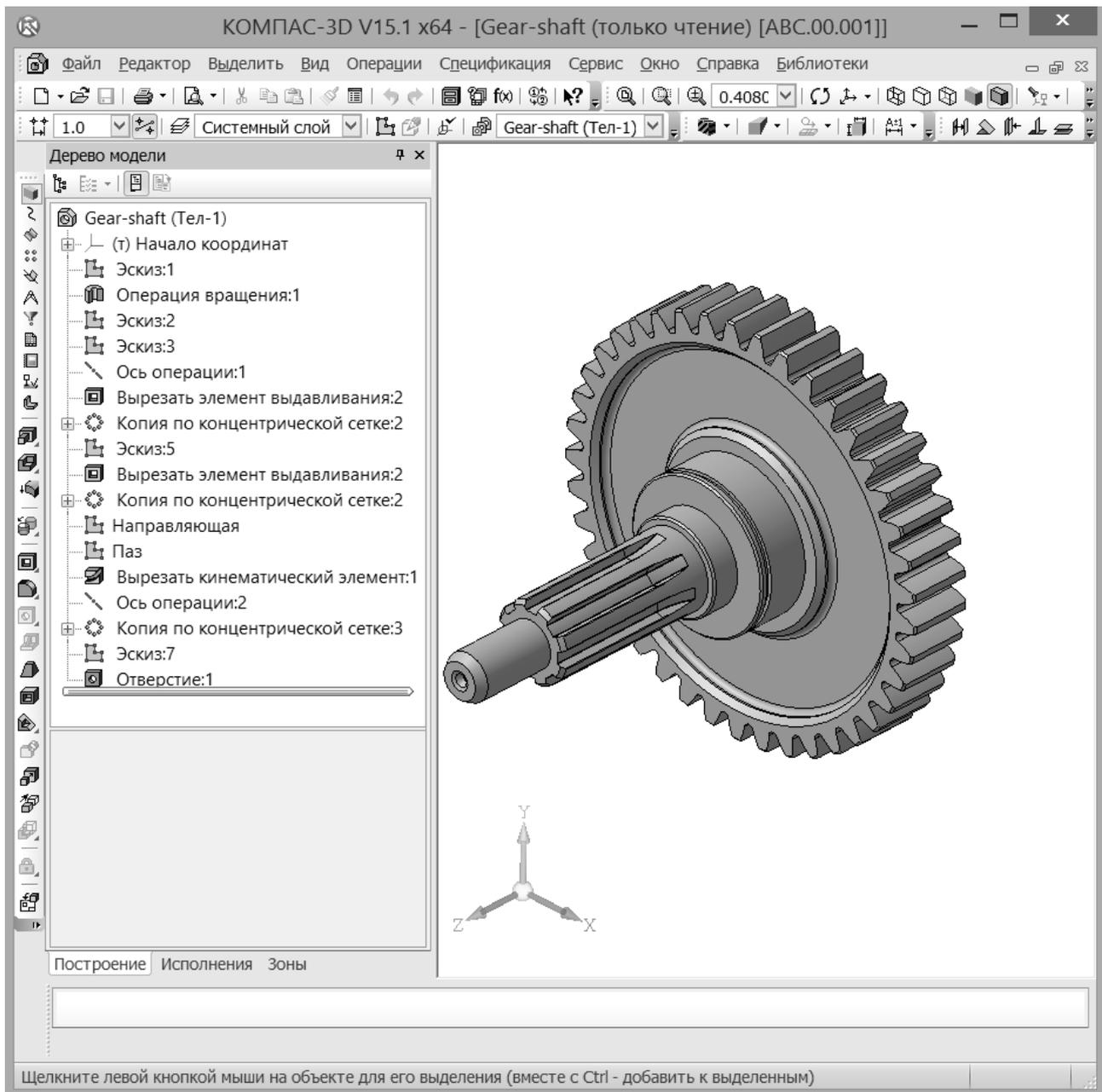


Рисунок 2.49 — Геометрическая модель зубчатого передаточного вала с иерархическим деревом построений в КОМПАС-3D

Говоря о затруднениях, которые могут возникнуть при моделировании с применением технологии с историей построения, можно отметить, что сама история построения и является основным источником возникновения трудностей [21]. Они возникают и наиболее ощутимы, главным образом, когда необходимо отредактировать какую-нибудь сложную модель. Редактирование одной из операций, созданных вначале процесса моделирования, требует последовательного выполнения всех последующих операций, оно требует привнесения изменений в перестроение целой цепочки в модели.

Удаление же одной из формообразующих операций может привести к нежелательному удалению других элементов, находящихся в иерархической зависимости от удаляемой операции. При удалении одного из элементов дерева модели в КОМПАС-3D появляется диалог, который информирует о том, какие зависимые операции построения будут неизбежно удалены автоматически.

Другой известный недостаток параметризации на основе истории состоит в том, что решение о том, какие параметры модели можно менять, принимается в процессе ее создания. Если потом вам вдруг потребуется поменять какой-то параметр, который отсутствует в дереве построения, то решение будет непростым — либо полностью перестроить модель с нуля, либо применять сложные оптимизационные алгоритмы, которые путем варьирования значений определяющих параметров пытаются подобрать желаемое значение требуемого параметра.

В системах автоматизированного проектирования с иерархической параметризацией существуют некоторые инструменты и приемы, позволяющие бороться с нежелательными последствиями редактирования или удаления какой-то одной операции. Можно менять дерево модели, изменяя порядок построения путем перемещения определенных операций по дереву, если это позволяют иерархические связи (рисунок 2.50).

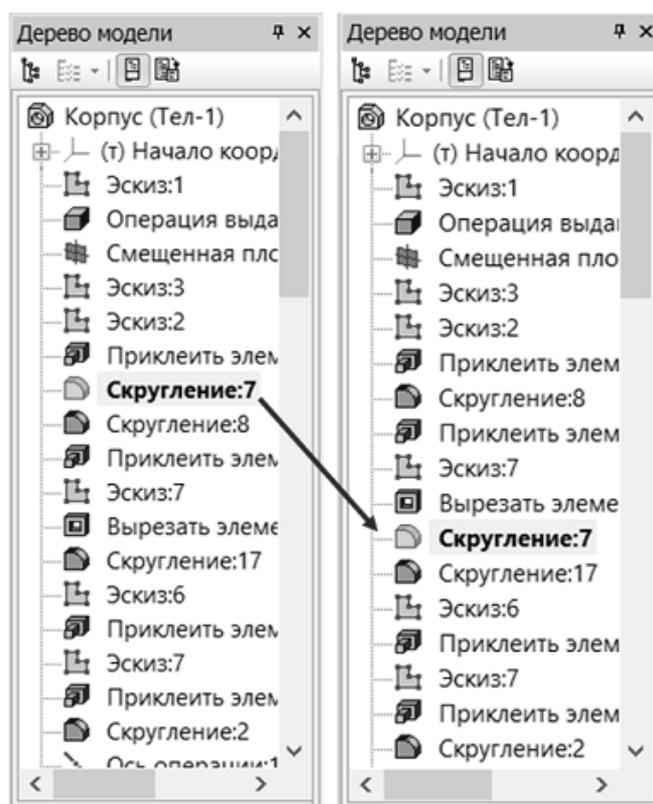


Рисунок 2.50 — Пример перемещения операции «Скругление:7» по иерархическому дереву модели КОМПАС-3D

Существуют также так называемые функции отката истории построения наверх, позволяющие вернуться к истокам моделирования и добавить новые элементы на начальных этапах процесса построения модели.

Однако все эти действия представляют собой довольно непростой процесс, требующий понимания истории построения модели, определенных навыков работы в САПР, а также внимания, сосредоточенности и тщательности. Ведь не только важно свести к минимуму нежелательное удаление объектов геометрии, но и необходимо, прежде всего, найти требуемый геометрический элемент в дереве построения, понять историю моделирования. Это особенно сложно, если модель была создана задолго до того, как возникла необходимость ее изменить, или была создана кем-то другим.

Наконец, еще одной ключевой проблемой параметризации на основе истории является невозможность применения этой технологии при работе с разнородными (*multi-CAD*) и унаследованными данными. Дело в том, что при трансляции модели из одного формата в другой история построения обычно теряется — транслируется только сама геометрия, которая в таком случае называется «немой». Некоторые трансляторы способны конвертировать конструктивные элементы из одной системы в другую, но они не являются панацеей, т. к. номенклатура конструктивных элементов в каждой системе своя, и трансляция один-в-один невозможна в принципе.

### **2.3.4 Прямое моделирование и редактирование**

Технология прямого моделирования — это сравнительно молодая технология для всей отрасли САПР в целом. В системах *прямого моделирования* дерево построения отсутствует. Пользователь редактирует саму геометрию, двигая ее граничные элементы.

Прямое редактирование геометрии, не обладая ни одним из недостатков описанных выше методов параметризации, является перспективным кандидатом на базовое средство для редактирования трехмерной формы [21]. Первые реализации методов прямого редактирования в большинстве САД были лишены ключевой особенности параметрического редактирования на основе истории построения — возможности внесения в модель только тех изменений, которые не нарушают ее конструктивной целостности. Первой коммерческой САПР, реализовавшей в 2007 г. идеологию прямого моделирования для создания и редактирования твердотельных 3D-моделей, является SpaceClaim. Программа адресована инженерам, которым необходимо внести свой вклад в разработку изделия, но которые в настоящее время не используют ни одну из «первичных» MCAD-систем. Программа может работать с большинством форматов 3D MCAD-систем, а также хранить данные в собственном, полностью открытом формате, основанном на технологии XML.

При прямом редактировании пользователь осуществляет необходимые операции (перенос/вращение/копирование/удаление) одной или нескольких

граней/ребер/вершин тела (например, образующих один конструктивный элемент). А система автоматически меняет размеры и форму других геометрических элементов, поддерживая топологическую корректность модели (при перетаскивании отдельных граней модель не «развалится», а сохранит «водонепроницаемость») и стараясь сохранить ее конструктивную концепцию (например, сохранение параллельности граней после редактирования). Пример редактирования модели в системе прямого моделирования приведен на рисунке 2.51. Поскольку большинство современных САПР поддерживают граничное представление (B-Rep) твердых тел, то прямое редактирование является ничем иным, как редактированием граничного представления геометрии.

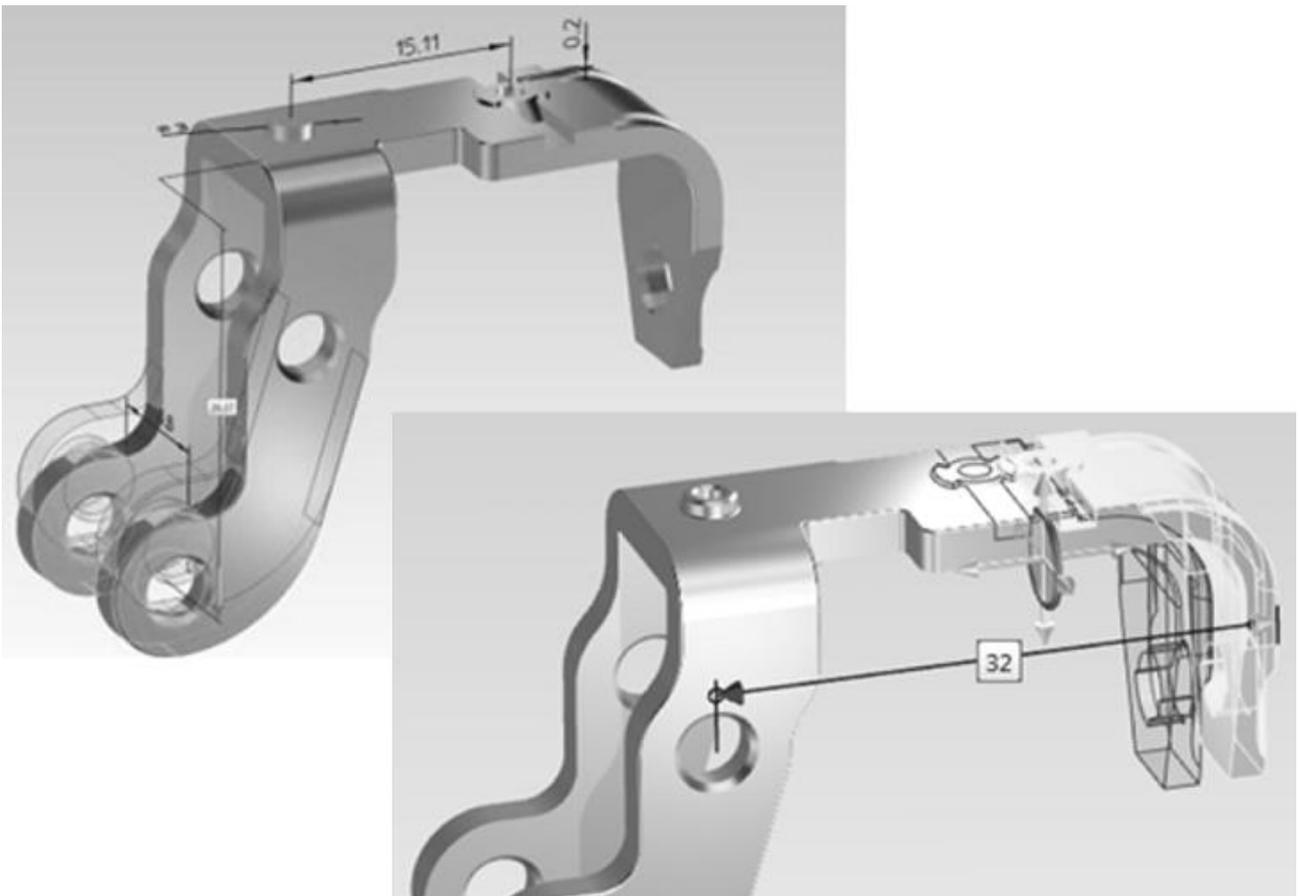


Рисунок 2.51 — Прямое редактирование модели в Creo Direct

Преимущества прямого редактирования состоят в следующем:

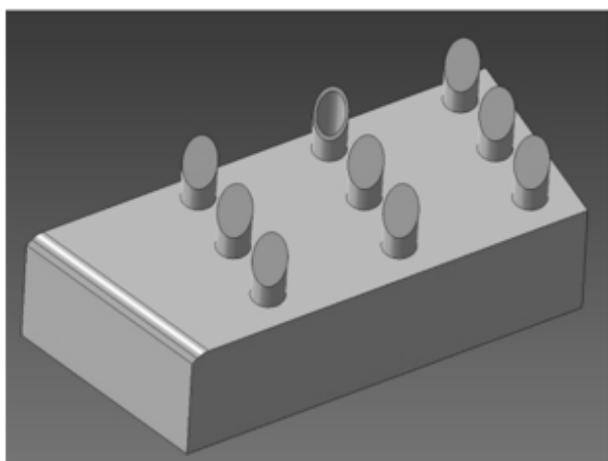
— прямое редактирование обеспечивает огромный скачок в *гибкости* по сравнению с косвенным редактированием, основанным на истории построения (в системах с деревом построения редактируем только те параметры, которые присутствуют в дереве, при прямом редактировании можно подвинуть все, что угодно на какое угодно расстояние, повернуть на какой угодно угол);

— прямое редактирование является более наглядным — изменения сразу же отображаются на экране, стоит лишь передвинуть манипулятором необходимый элемент геометрии (грань, ребро или вершину);

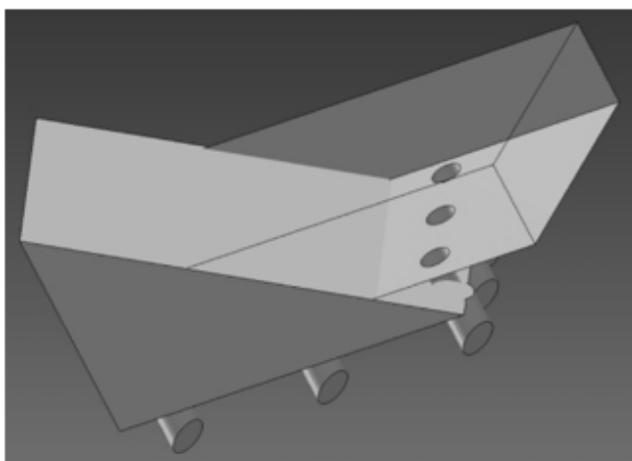
— средства прямого моделирования позволяют работать с геометрическими моделями, созданными практически в любой САД-системе. Производители теперь могут импортировать любую САД-геометрию, независимо от того, как она была создана – средствами прямого или основанного на истории построений моделирования. После этого 3D модель можно модифицировать для задач подготовки производства. Например, инженеры-технологи могут добавить заготовку или же удалить какие-то конструктивные элементы, что бывает необходимо для различных операций обработки;

— главной проблемой при работе с разнородными данными является потеря интеллектуальности, присущей исходной модели в той системе, где она была создана. В чужой системе теряется история построения модели, теряются параметрические связи между ее элементами. Именно в этом месте родился термин «немая» геометрия, который метко объясняет суть проблемы: геометрия есть, но рассказать о своей конструктивной концепции она ничего не может. Некоторые системы прямого моделирования позволяют редактировать геометрию без истории построения параметрически, а аппарат геометрических ограничений позволяет воссоздать и сохранить конструктивную концепцию любой модели.

Несмотря на все описанные преимущества, одной из проблем, возникающих при прямом редактировании, является сохранение конструктивной целостности. Иногда, для сохранения исходного замысла конструктора, в системах прямого редактирования приходится прибегать к ручному заданию большого количества геометрических ограничений (взаимной параллельности, перпендикулярности, соосности и т. п. отдельных элементов формы). Иллюстрацией случая потери топологической корректности и конструктивной целостности в процессе редактирования служит модель, приведенная на рисунке 2.52.



а)



б)

Рисунок 2.52 — Некорректное редактирование: а) исходная модель; б) «вывернутая»

Первые системы, которые объединяют возможности параметрического моделирования со средствами прямого редактирования моделей, это системы от Siemens PLM Software с так называемой синхронной технологией. Сначала синхронная технология была реализована в Solid Edge, а затем и в NX и продолжает активно развиваться в настоящий момент. Концептуально схожи и технологии, предлагаемые Inventor Fusion (Autodesk) и российской компанией ЛЕДАС (реализованно в Bricscad и КОМПАС-3D).

Комбинируя возможности иерархической параметризации и решателя геометрических ограничений, специалисты компании Siemens PLM Software реализовали в Solid Edge так называемые синхронные (декларативно заданные с помощью ограничений) конструктивные элементы, предоставив своим пользователям выбор — либо сразу проектировать свои модели с использованием синхронных элементов, или строить гибридные модели с деревом построения, включающим как классические процедурные (основанные на истории построения), так и новые синхронные элементы.

Компании Autodesk и РТС предложили прямое моделирование геометрии осуществлять в отдельных приложениях (Inventor Fusion и Creo Direct соответственно), где пользователь применяют к модели операции прямого и косвенного (с помощью управляющих размеров) редактирования, не имея доступа к дереву ее построения. Но затем та же самая модель может быть загружена в классическое приложение на основе истории построения (Inventor и Creo Parametric), где изменения, сделанные с ней в системе прямого моделирования, могут быть интегрированы в ее дерево построения. Эти продукты обеспечивают возможности прямого редактирования с полноценным параметрическим контролем (сохраняются наложенные ранее ограничения, например, параллельность граней).

Способом разрешить ситуацию с неоднозначностью поведения модели в системах прямого моделирования стала предложенная компанией ЛЕДАС технология *вариационного прямого моделирования (ВПМ)*, дающая пользователю возможность использовать аналог параметрического проектирования на основе истории построения совместно с прямым моделированием. Эта технология использует аппарат геометрических ограничений, который позволяет при редактировании сохранять конструктивную концепцию проектировщика.

Технология ВПМ поддерживает создание и модификацию геометрических моделей с помощью явных и неявных ограничений. Положение любого объекта может быть зафиксировано в абсолютной системе координат или относительно других объектов. Поддерживаемые типы геометрических ограничений включают в себя логические отношения между геометрическими сущностями (совпадение, параллельность, касание и т. п.) и размерные отношения, которые задают требуемые значения расстояний, углов или радиусов. Инструменты модификации модели позволяют автоматически сдвигать и вращать объекты в такие положения, где удовлетворяются все наложенные на них ограничения, стараясь свести к минимуму трансформации из начальной конфигурации.

Несмотря на то, что функционал систем прямого моделирования непрерывно нарастает, нельзя не обратить внимания и на присущие им на сегодняшний день недостатки.

Во-первых, остается невозможным редактирование сложных форм и NURBS-поверхностей. Одно дело — распознать в модели с отсутствующей историей построения плоские, цилиндрические, сферические, конические, торические грани. Другое дело — понять, что данная грань является результатом применения операций заметания плоского контура при движении вдоль заданной кривой, построение тела по его плоским сечениям, гладкого сопряжения двух поверхностей и т. п.

Во-вторых, системы прямого моделирования слишком просты для освоения. В результате падает интеллектуальный уровень пользователей. Им сложно потом переходить на системы с историей построения. Поэтому системы прямого моделирования должны становиться все более интеллектуальными.

## **2.4 Автоматизация выполнения конструкторской документации**

### **2.4.1 Задача конструирования**

Под *конструированием* понимают разработку конструкции по предварительным расчетам, реализованную в *конструкторскую документацию*, которая является одной из важных и наиболее трудоемких в САПР. Ее решение осуществляется с помощью графической подсистемы *автоматизации выполнения конструкторской документации (АКД)* или автономной (локальной) *системы АКД* со структурой и принципами построения, аналогичными САПР. Локальные системы АКД часто используются в производственной практике на начальной стадии внедрения САПР, когда ее создание опережает разработку САПР или когда система АКД инвариантна, т. е. применима ко многим САПР.

Средства реализации систем АКД предоставляет *компьютерная графика*, обеспечивающая создание, хранение и обработку *моделей* геометрических объектов (ГО) и их графических изображений (ГИ) с помощью компьютера. Использование компьютера в конструкторской деятельности как электронного кульмана значительно облегчает подготовку конструкторских и других графических документов, связанных с изготовлением изделий, сокращает сроки их разработки с улучшением качества. Особенно это эффективно при конструировании устройств на базе параметрически управляемых унифицированных и типовых элементов конструкций, обеспечивающих их многовариантность.

Автоматизация конструирования и подготовки производства на основе создания трехмерных моделей ГИ включает: прочностные и кинематические расчеты, компоновку, технологические процессы изготовления и сборки деталей. Модель ГО содержит информацию о его геометрии и используется как для двумерного моделирования, так и для расчета различных характеристик ГО и технологических параметров его изготовления. Таким образом, геометрическое моделирование является *ядром* САПР и АСТПП.

## 2.4.2 Структура и основные принципы построения системы АКД

Конструкторская документация (КД) необходима на всех этапах процесса проектирования изделия — от получения и уточнения ТЗ до передачи и сопровождения КД на предприятии-изготовителе (рисунок 2.53).

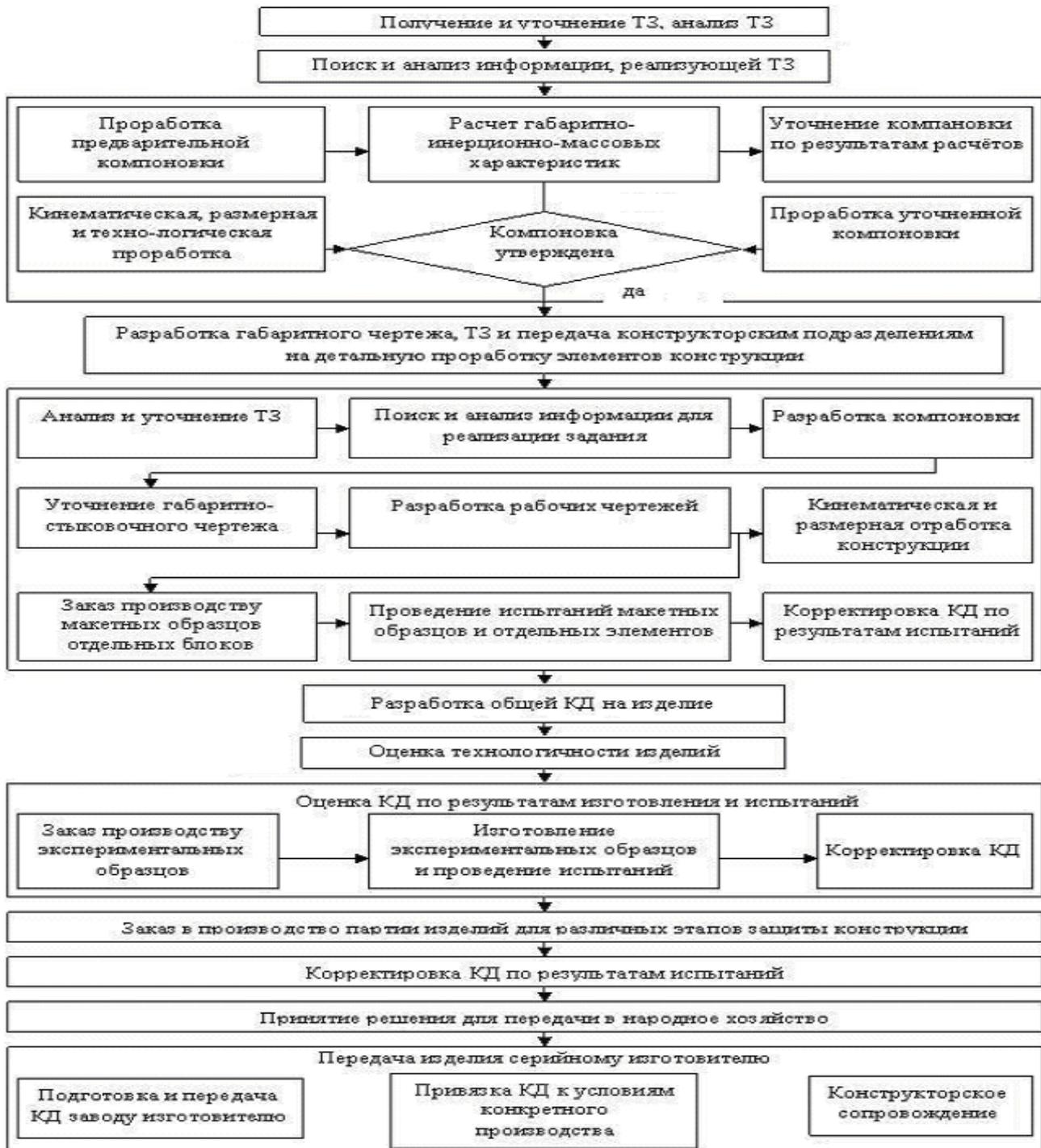


Рисунок 2.53 — Структура и последовательность работ, выполняемых в процессе проектирования изделия

Система АКД выполняет ввод, хранение, обработку и вывод графической информации в виде КД. Для реализации системы необходимы:

— документы, регламентирующие работу системы АКД, — исходная информация для формирования информационной базы;

— информационная база, содержащая модели ГО, ГИ, элементы оформления чертежа по ЕСКД;

— технические и программные средства создания моделей ГО и ГИ и их вывода;

— интерфейс пользователя в виде графического диалога с компьютером.

Все перечисленные составляющие образуют методическое, информационное, техническое, программное и организационное обеспечение АКД.

Эффективность применения АКД при разработке КД обеспечивается следующими ее возможностями:

— наличием *средств преобразований*: поворота, переноса, симметрирования, масштабирования, построения зеркального изображения и др.;

— использованием *готовых фрагментов чертежей*: конструктивных и геометрических элементов, унифицированных конструкций, стандартных и типовых изделий;

— ведением *диалога с компьютером в привычных для конструктора терминах* и с привычными для него ГО и ГИ;

— наличием *языковых средств описания типовых моделей-представителей чертежей* объектов, когда процесс создания конкретного чертежа изделия сводится к заданию размеров;

— получением *чертежей высокого качества*, оформленных по стандартам ЕСКД путем вывода на графопостроители, принтеры и другие устройства.

Построение АКД целесообразно выполнять в виде *систем-надстроек* над базовой графической системой, содержащей необходимые возможности.

Основными принципами построения систем АКД являются:

— *адаптируемость* системы АКД к различным САПР, т. е. расширение возможностей ее использования;

— *информационное единство* всех частей АКД и САПР, которое предполагает единство базы данных для различных назначений (использование модели ГО и ГИ как для формирования чертежей, так и для расчетов, например, автоматизации разбиения объекта на элементы и последующей передачи данных в программное обеспечение с применением метода конечных элементов);

— *возможность расширения* системы АКД путем дополнения новыми составными частями и развития имеющихся;

— *инвариантность*, т. е. максимальная независимость составных частей и системы АКД в целом по отношению к проблемно-ориентированным системам АКД и САПР. Например, система электронных устройств может быть использована как графическая подсистема в системе управления робототехническим комплексом и как графическая подсистема в системе управления контрольно-измерительным устройством.

Построение таких систем значительно упрощается, если они создаются на базе универсальной, открытой среды проектирования для реализации графических возможностей САПР. Примерами такой среды являются *Автокад*, *Компас* — универсальные графические системы, в основу структуры которых положен принцип открытой архитектуры, позволяющий адаптировать и развивать многие функции применительно к конкретным задачам и требованиям. Примерами подсистем АКД являются надстройки для формирования чертежей типовых машиностроительных деталей, сборочных чертежей механических устройств, анимационных кинематических схем и др.

### 2.4.3 Подходы к представлению и хранению графических данных

Можно выделить два подхода к конструированию на основе компьютерных технологий.

*Первый подход* базируется на двумерной геометрической модели ГИ и использовании компьютера как *электронного кульмана*, позволяющего значительно ускорить процесс конструирования и улучшить качество оформления КД. Центральное место в этом подходе к конструированию занимает *чертеж*, который служит средством представления изделия, содержащего информацию для решения графических задач, а также для изготовления изделия (рисунок 2.54). При таком подходе получение графического изображения за компьютером будет рациональным и достаточно эффективным, если созданное ГИ используется многократно.

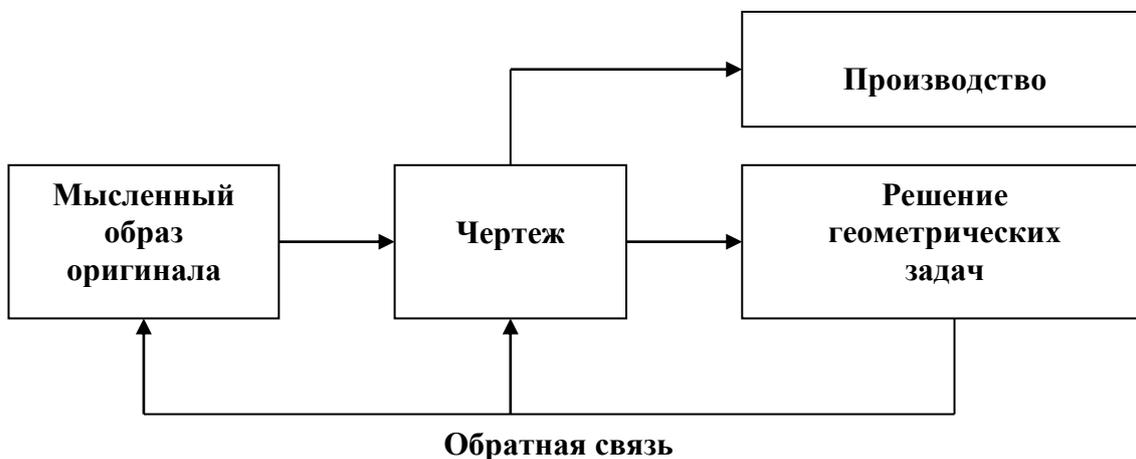


Рисунок 2.54 — Схема традиционной технологии конструирования

В основе *второго подхода* лежит *пространственная геометрическая модель (ПГМ)* изделия (рисунок 2.55), которая является более наглядным способом представления оригинала и более мощным и удобным инструментом для решения геометрических задач. Чертеж в этих условиях играет вспомогательную роль, а способы его создания основаны на методах компьютерной графики, методах отображения пространственной модели.

При первом подходе (традиционный процесс конструирования) обмен информацией осуществляется на основе конструкторской, нормативно-справочной и технологической документации; при втором — на основе внутреннего машинного представления ГО, общей базы данных, что способствует эффективному функционированию программного обеспечения САПР конкретного изделия.



Рисунок 2.55 — Схема технологии трехмерного конструирования

Геометрическое моделирование и виды моделей ГО подробно рассмотрены в разделе 2.2. На рисунке 2.56 дан пример формирования моделей ГИ и ПГМ графического изображения детали.

На *первом этапе* реальный объект (в примере деталь) подвергается абстракции, в результате которой определяется *информационная модель*.

На *втором этапе* в информационной модели выделяют уровни структуризации данных и их взаимосвязи, чаще всего с учетом процессов обработки информации в задаче проектирования. Таким образом осуществляется уточнение и структурирование информации *с логической точки зрения*. Существенным моментом в этом представлении является то, что оно должно отражать характеристики не одной детали, а целого класса деталей на различных стадиях проектирования, фиксируемых в технической документации.

При формировании *информационной модели* предполагается использование множества *конструктивных элементов* для получения деталей произвольной формы, *геометрических элементов* (точек, контуров, поверхностей, элементарных и сложных объектов), которые обеспечивают обработку геометрической информации для всех процессов автоматизированного проектирования. Таким образом строится *модель данных*, которая отражает логическую структуру данных.

На *третьем этапе* осуществляется процесс отображения модели данных во внутреннее машинное представление — формирование *модели доступа*, которая ориентирована на физическое размещение данных в компьютере.

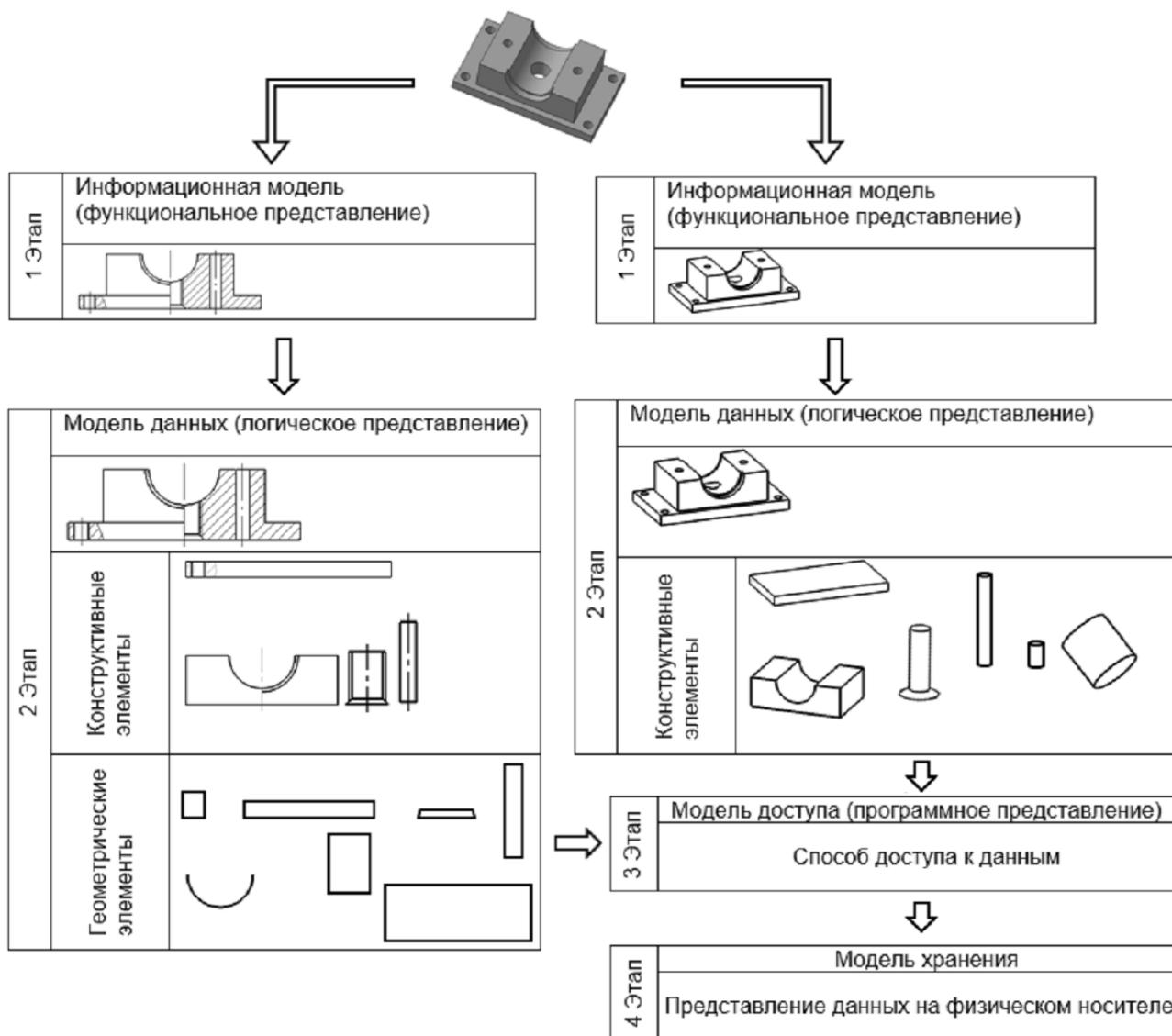


Рисунок 2.56 — Отображение описания реального объекта во внутреннее машинное представление

На *четвертом этапе* определяется *модель хранения*, которая задает отображение данных в модели доступа на физическую память и управление ими. Существуют три способа организации данных на физических носителях: последовательный, объектно-иерархический и прямой. В Автокад, например, используется объектно-иерархический способ хранения геометрических данных, что дает возможность пользователю хранить данные об объектах на физических носителях независимо от их логической последовательности.

Исполнение изделия определяется заданными параметрами, обнуление которых приводит к исключению составных элементов ГО. В простейшем случае изменяют только размеры, а конструкция отдельных вариантов семейства изделий остается неизменной. Такой вид конструирования называют *принципиальным* (т. е. с сохранением принципа конструкции).

При *принципиальном конструировании* данные технологической документации не подготавливаются каждый раз заново, а закреплены за уже имеющимися принципиальными чертежами. Применение такого метода предполагает, что уже сделан выбор геометрии для проектируемого изделия. Области применения: проектирование отдельных деталей (пружин), комплексных функциональных узлов (подшипников), готовых изделий (трансформаторов, инструмента). Затраты на описание типовой модели велики по сравнению с затратами на получение вариантов, поэтому многие системы используют принцип вложенности моделей: один раз описанные типовые модели используются для описания других типовых моделей.

Применительно к технологии обработки в этом случае можно говорить о типовом технологическом процессе. При необходимости обновления комплексной информации о типовом технологическом процессе или чертеже на группу изделий в систему вводятся новые варианты сочетаний различных исходных параметров.

В противоположность вариантному методу, при *генерирующем методе* определяются различные сочетания конструктивных (иначе конструкционных) и технологических элементов и выбирается наилучшее решение. Принцип работы системы, использующей генерирующий метод, основан на разделении ГО на элементы и создании новых ГО из имеющихся элементов. Различают следующие группы элементов: основные (функциональные), вспомогательные (конструктивные геометрические и элементы формы) и технологические.

На рисунке 2.56 приведен пример такого разделения детали на элементы. С помощью основных элементов создается геометрическая форма детали (наружные и внутренние поверхности, проточки). Это дает, прежде всего, общее описание детали. С использованием вспомогательных элементов, которые непосредственно связаны с основными, осуществляется более подробное описание детали, что позволяет полностью передать ее геометрическую форму. Технологические элементы или характеристики относятся и к основным, и к вспомогательным элементам. Они также влияют на простановку размеров.

САПР, работающие по генерирующему принципу, обладают высокой гибкостью и пригодны для решения различных задач. Этот метод эффективен, так как опыт показывает, что большинство конструкторских разработок, называемых новыми конструкциями, создается путем ранее не использовавшегося сочетания элементов, давно известных как по принципу функционирования, так и по исполнению.

### **3 Оптимизация проектных решений при автоматизированном проектировании**

Для решения стоящих перед современным машиностроением задач повышения надежности и производительности необходимо широкое внедрение методов и результатов научных исследований в практику проектно-конструкторских работ. Одно из важнейших мест при этом принадлежит научным методам оптимизации параметров машин, направленным на получение объектов с наилучшими свойствами.

Теория оптимизации находит сегодня эффективное применение во всех направлениях инженерной деятельности. Это, в первую очередь, проектирование систем и их составных частей, планирование и анализ функционирования существующих систем, инженерный анализ и обработка информации, управление динамическими системами.

Решение инженерных задач оптимизации в приемлемые сроки в большинстве случаев невозможно без применения компьютера, т. е. без автоматизации проектирования. Для САПР характерно рациональное распределение функций между человеком и компьютером, а также обоснованный выбор моделей и методов для автоматизированных процедур.

Для многих объектов машиностроения (например, для стреловых систем грузоподъемных кранов, металлических конструкций и т. д.) сегодня решены задачи интеграции различных этапов САПР, связанных с выводом графической информации (например, получение графических изображений схем стреловых устройств и чертежей металлических конструкций стрел).

#### **3.1 Постановка задачи. Основные этапы оптимального проектирования**

Термин «оптимальный» означает «наилучший». Слово «оптимум» в значении «наиболее благоприятные условия для чего-либо» имеет латинское происхождение и употреблялось еще в Древнем Риме. Так, в Медицинской энциклопедии Авла Корнелия Цельса (I в. н. э.) сказано: «Optimum medikamentum quies est» («Наилучшее лекарство — это покой»). Еще раньше, в Древнем Риме во времена Гая Гракха оптиматами, т. е. лучшими, составляющими цвет общества, называли представителей рабовладельческой аристократии.

Из определения понятия «оптимальный» следует, что бессмысленны выражения «самый оптимальный», «более оптимальный», «менее оптимальный» и т. п. Распространившееся в последнее время словосочетание «оптимальное проектирование конструкций» употребляется рядом авторов в значении «проектирование оптимальных конструкций».

Стремление к тому, чтобы результаты деятельности были наилучшими, органически присуще человеку. Способность человека творить по законам красоты, т. е. добиваясь наилучшего результата, максимального приближения к

идеалу, «соразмерности» частей между собой и в соответствии с целым, является таким же неотъемлемым свойством человека, как мысль, речь и труд. Задолго до того, как задачи оптимального проектирования выделились в отдельный класс задач, люди стремились проектировать наилучшим образом. Так, разрабатывая проект вала для редуктора, конструктор разумно выбирает материал, рационально принимает очертания детали (чтобы они, с одной стороны, могли быть изготовлены с малыми затратами, а с другой, приближались к форме равного сопротивления), целесообразно (т. е. с учетом имеющегося опыта и здравого смысла) назначает чистоту поверхности и способ механообработки и т. д.

Рационально решая все эти и другие вопросы, конструктор сознательно или интуитивно сравнивает различные варианты решения задачи и, в конечном счете, из множества этих вариантов выбирает тот, который представляется ему наилучшим. Выбор такого варианта не представляет трудностей и не требует от опытного конструктора какой-то особой методологии, *пока речь идет о сравнительно простых объектах.*

*При решении достаточно сложных задач* возникает ряд противоречий, затрудняющих принятие конструктором решения о выборе наилучшего варианта. Эти трудности сводятся к следующему.

Во-первых, варианты, образующие множество допустимых решений, разнообразны по своей структуре. Так, тормоза подъемно-транспортных машин могут быть колодочными (с длинноходовым или короткоходовым магнитом или с гидротолкателем), ленточными, осевыми (с коническими или плоскими фрикционными элементами). Стрелы порталных кранов могут быть прямыми (с уравнивающим полиспадом, блоком или барабаном), сочлененными (с прямым или профилированным хоботом), телескопическими и т. д. На рисунке 3.1 для примера приведена классификация реализованных на практике структур крановых порталов. При этом не исключено, что действительно наилучший вариант не содержится во множестве известных, уже реализованных структур, а лежит вне его и может составить предмет изобретения.

Во-вторых, для каждой структуры можно предположить множество допустимых вариантов, различающихся между собой по числовым значениям параметров. Так, для коробчатого сечения балки при фиксированном моменте сопротивления существует бесчисленное множество сочетаний линейных размеров и толщин поясов и стенок, реализующих требуемый момент сопротивления. Для сочлененных стрел порталных кранов можно составить сколько угодно приемлемых сочетаний длин плеч хобота, стрелы, оттяжки, координат шарниров, блоков и т. д. Для рамных порталов кранов на колонне с крестообразным ригелем можно варьировать длины элементов пространственной рамы и сечения этих элементов.

Наконец, состав требований, предъявляемых к объекту, весьма разнообразен, а сами эти требования находятся часто между собой в диалектическом противоречии: изменение параметров объекта в направлении улучшения одних его свойств приводит к ухудшению других.

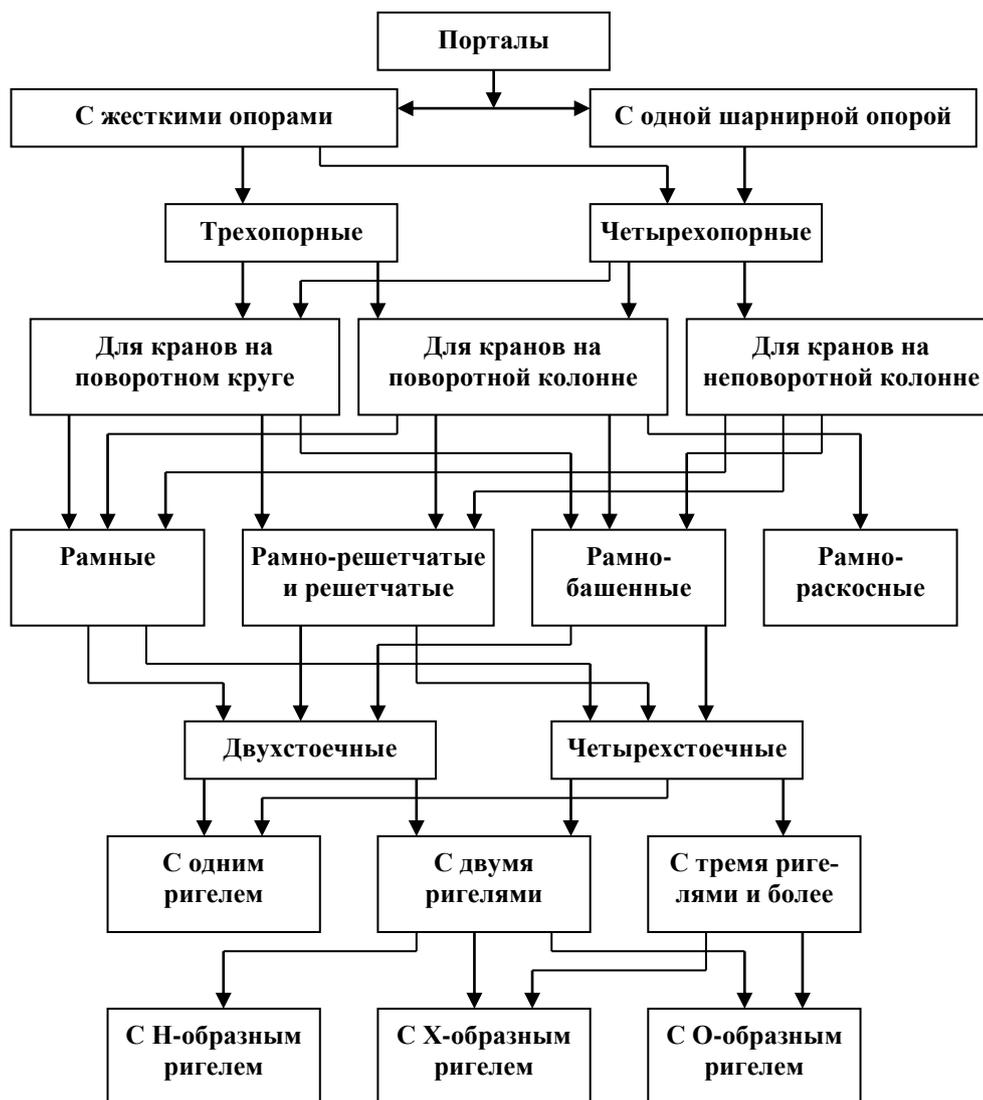


Рисунок 3.1 — Классификация реализованных на практике структур крановых порталов

Так, стрелы порталных кранов должны иметь возможно меньшую массу, мало уклоняющуюся от горизонтали траекторию груза, удовлетворительные характеристики изменения по вылету грузового неуравновешенного момента. Они должны обладать статистической прочностью, сопротивлением усталости, статической и динамической жесткостью и т. д.

При этом прямые стрелы для кранов средней и большой грузоподъемности легче, чем сочлененные, что выгодно для завода-изготовителя и отчасти для эксплуатации (например, уменьшение нагрузок на крановые пути и издержек на уход за ними). Однако они имеют большие прогибы и время затухания колебаний, большие длины подвеса груза и амплитуду его раскачивания, что мешает нормальной эксплуатации (увеличивает длительность цикла работы крана и уменьшает его производительность).

Механизмы передвижения кранов мостового типа с отдельным приводом легче, проще, дешевле, они лучше отвечают требованиям унификации при серийном производстве, чем механизмы с центральным приводом, но приводят

к увеличению перекосных нагрузок при несимметричной загруженности опор и, возможно, к увеличению массы кранов в целом.

Рамные двухстоечные порталы при прочих равных условиях легче и дешевле четырехстоечных, имеют пониженную вертикальную жесткость, что уменьшает расчетные нагрузки на крановые пути, однако с этим сопряжены пониженная горизонтальная жесткость, увеличенные перемещения точки подвеса груза. Перечень подобных противоречивых ситуаций можно продолжать сколь угодно долго. В этих условиях выбор оптимального варианта уже невозможен на уровне интуиции конструктора и требует специальной методологии.

*Оптимальное решение — это наилучшее решение в исследуемом множестве вариантов и в каком-то определенном смысле. Его нахождение и есть цель оптимального проектирования.*

Исходя из этого определения, можно установить основные этапы оптимального проектирования:

1) разработка расчетной схемы на основе геометрического изображения (осевого контура) и системы параметров объекта, т. е. таких независимых величин, задание значений которых достаточно для описания любого варианта, входящего в исследуемое множество и однозначно определяющего положение объекта в пространстве;

2) разработка системы критериев качества, т. е. функций параметров, характеризующих интересующие нас свойства объекта, и принятие одного из критериев качества как важнейшего. Такая система наиболее значимых критериев объекта называется **целевой функцией**;

3) разработка системы ограничений на числовые значения параметров и критериев качества и тем самым формирование множества вариантов, на котором ищется оптимальное решение;

4) формирование математической модели;

5) разработка алгоритма оптимизации и его реализация на компьютере. Под алгоритмом оптимизации понимают вычислительную процедуру, позволяющую установить числовые значения параметров, обеспечивающие экстремум целевой функции при выполнении ограничений.

Важно отметить, что в связи со сложностью инженерных задач оптимального проектирования, их решение может быть получено в приемлемые сроки только с применением быстродействующих компьютеров, которые могут очень быстро выполнять предписанные им операции. Компьютер является лишь техническим средством решения задачи оптимального проектирования, освобождая человека от непосильной для него вычислительной работы и оставляя ему все творческие функции. Человек составляет алгоритм и программу решения задачи, выполняет отладку программы, анализирует полученные результаты. Наконец, на нем лежит все бремя ответственности за принятое решение. Таким образом, оптимальное проектирование требует ограниченного сочетания инженерного и математического подходов.

### 3.2 Параметры объектов оптимизации

Как уже отмечалось, под параметрами объекта оптимизации понимают физические величины, в своей совокупности достаточные для его описания. Взаимосвязь параметров и их значений аналогична взаимосвязи алгебраической величины и ее числового значения. В записи  $t = 17^\circ\text{C}$  температура  $t$  — алгебраическая величина,  $17^\circ\text{C}$  — ее числовое значение. В записях  $X_4 = S$  или  $X_4 = 8,2$  м:  $X_4$  это параметр, а  $S$  или  $8,2$  м — его значение. Придав всем параметрам конкретные числовые значения, мы получим один из вариантов объекта. При этом должны быть определены все параметры, не должно остаться неопределенных.

Систему параметров объекта, имеющего конкретную структуру, можно сформировать различным образом, однако в любом случае число параметров неизменно. Например, для дважды симметричного коробчатого сечения балки (рисунок 3.2) можно предположить такие системы параметров:

- 1)  $h, b, \delta_n, \delta_c$  (рисунок 3.2, а);
- 2)  $H, B, h, b$  (рисунок 3.2, б);
- 3)  $h, b, \delta_n, \delta_c$  (рисунок 3.2, в) и т. д.

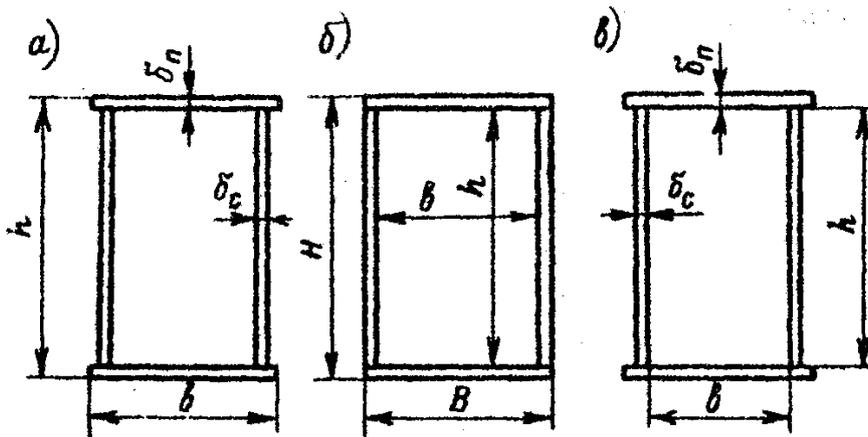


Рисунок 3.2 — Дважды симметричное коробчатое сечение балки

Составление системы параметров — это очень важный этап оптимального проектирования, во многом определяющий его стадии. При формировании системы параметров следует стремиться к тому, чтобы любой параметр мог принимать любые значения в достаточно широком диапазоне независимо от значений других параметров. Например, для многосвязных стреловых систем кранов, уравнивающих устройств, клешевых грузозахватов, грейферных механизмов систему параметров желательно составить так, чтобы при любом сочетании их значений выполнялись условия существования механизма. Желательно, чтобы изменение каких-либо параметров существенно влияло на характеристики объекта в полезном для нас смысле.

Поясним сказанное примерами. Шарнирно-сочлененная стрела с грузовыми канатами, идущими вдоль ее элементов, описывается девятью параметрами, к числу которых могут быть отнесены (рисунок 3.3, а): длины звеньев  $l_1, \dots, l_6$ , угол  $l_7$  наклона стойки, вылеты от оси качания  $l_8$  и  $l_9$ . В этой системе параметров не все они могут принимать значения независимо от остальных. В частности, допустимы лишь такие значения  $l_1, l_2, l_3$ , при которых выполняется условие

$$l_1 + l_2 > l_3.$$

Кроме того, необходимо соблюдение векторных равенств

$$l_1 + l_4 = l_6 + l_5 + l_3,$$

что соответствует двум скалярным равенствам, получаемым при проектировании векторов на координатные оси.

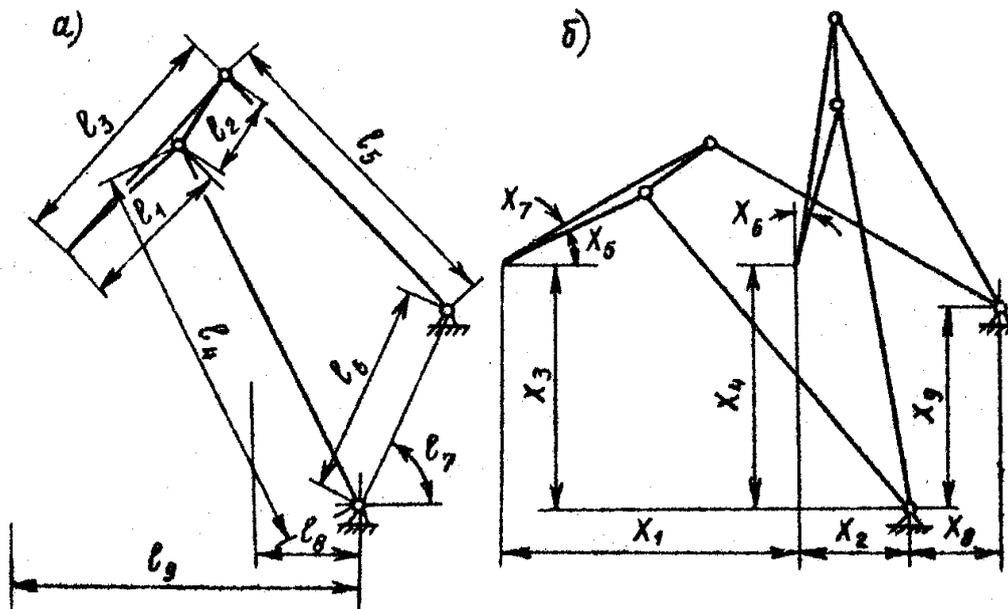


Рисунок 3.3 — Схема шарнирно-сочлененного стрелового устройства

Наконец, присвоение параметрам  $l_8$  и  $l_9$  числовых значений означает наложение ограничений по равенству, которые могут выполняться или не выполняться в зависимости от значений прочих параметров (при излишне коротких звеньях вылет  $l_9$  может оказаться недостижимым). Такая система параметров неудачна уже потому, что на каждом шаге процесса оптимизации схемы стрелы пришлось бы, прежде всего, проверять выполнение многочисленных ограничений и отбрасывать не удовлетворяющие им варианты.

Более удачна система параметров, показанная на рисунке 3.3, б. Здесь параметры  $X_1, \dots, X_4$  (в рассматриваемом случае часто  $X_3 = X_4$ ) в своей совокупности однозначно определяют длины переднего плеча хобота и стрелы, а все девять параметров — длины хобота и оттяжки. Кроме того, многие компоновочные ограничения (граничные вылеты, высота расположения конца хобота

над корнем стрелы, конструктивное расположение нижнего шарнира оттяжки и др.) можно выполнить заданием значений параметров. Вообще, чем больше параметров может быть задано из ограничений в форме равенств, тем лучше подходит система параметров для решения данной задачи оптимизации.

Выбор системы параметров является весьма важным этапом работы и требует глубокого понимания существа задачи и тонкой инженерной интуиции, поскольку это может влиять на всю стратегию решения, качественные свойства получаемого результата, быстроту сходимости вычислительного процесса оптимизации. Например, площадь  $F$  коробчатого сечения, которую следует минимизировать, в системе параметров, соответствующей рисунку 3.2, а, имеет вид

$$F = 2 (h\delta_c + b\delta_n),$$

а в соответствии с рисунком 3.2, б

$$F = HB - hb,$$

т. е. во втором случае вычисляется как разность величин, имеющих близкие числовые значения, что в принципе нежелательно.

Рассмотрим еще один пример. На рисунке 3.4 показаны три варианта системы семи параметров для уравнивающего механизма с шарнирным четырехзвенником и качающимся противовесом. Углы  $\varphi_0$  и  $\varphi_m$  установки стрелы на наибольшем и наименьшем вылетах являются ограничениями.

Первый вариант (рисунок 3.4, а) неудачен, потому что сочетания значений параметров  $(X_4, X_5, X_6)$  и  $(X_1, X_2, X_3, X_5, X_7)$  могут оказаться несовместными. У второго и третьего вариантов (рисунок 3.4, б, в) эти недостатки отсутствуют. Пусть далее требуется обеспечить некоторое (обычно довольно малое) значение  $M_n$  ( $\varphi_m$ ) момента противовеса на наименьшем вылете. Оно может быть достигнуто при определенном малом значении параметра  $X_6$ , что во втором варианте (рисунок 3.4, б) соответствует приближению заднего плеча противовеса к вертикали, а в третьем варианте (рисунок 3.4, в) — приближению тяги к прямой, проходящей через ось качания стрелы. Таким образом, в зависимости от принимаемой системы параметров в данном случае получаются разные варианты решения.

Параметры, входящие в одну систему, могут иметь различные размерности. В рассмотренных примерах они являются линейными или угловыми величинами (рисунки 3.3, 3.4).

Возможны и более сложные случаи. Например, для уравнивающего механизма на рисунках 3.4, б, в, параметрами могут быть значения  $M_{n1}$  и  $M_{n2}$  уравнивающего момента на граничных вылетах. Тогда какие-либо две геометрические величины из  $X_1, \dots, X_7$  (например, углы  $X_5$  и  $X_6$ ) будут производными, зависящими от  $M_{n1}$  и  $M_{n2}$  и остальных параметров. Они должны определяться из некоторых функциональных зависимостей либо по некоторому алгоритму.

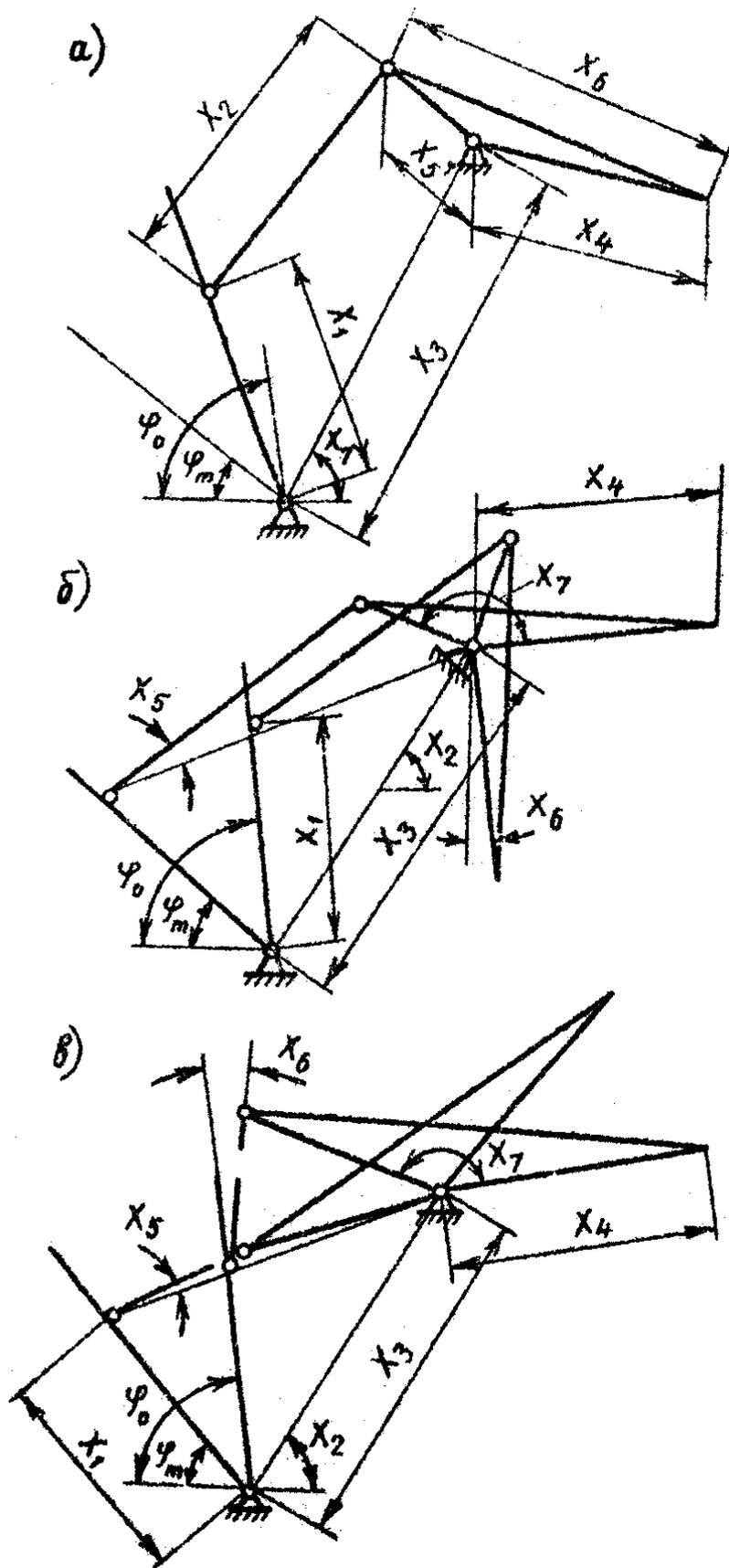


Рисунок 3.4 — Три варианта семи параметров уравновешивающего механизма

Большинство инженерных задач оптимального проектирования конструкций, в том числе подъемно-транспортных машин, являются многопараметрическими. При этом оказывается удобным пользоваться терминологией векторного анализа. Параметры объекта оптимизации часто называют фазовыми координатами, поиск оптимальных параметров — поиском в многомерном пространстве, а сам объект оптимизации в его конкретном варианте — многокомпонентным вектором  $\vec{X}$ , составляющие которого по координатным осям суть оптимизируемые параметры  $X_1, \dots, X_n$ . При числе параметров не более трех такое представление можно интерпретировать геометрически.

### 3.3 Параметрическая и структурная оптимизация

Задачи оптимального проектирования можно разделить на два класса. К первому классу относятся задачи, в которых структура объекта считается заданной и речь идет лишь об определении числовых значений параметров, свойственных данной структуре. Они называются задачами параметрической оптимизации. К ним относятся, например, оптимизация или сочлененных стрел, или коробчатых сечений металлических конструкций, или рамных двухстоечных порталов и т. д. Во всех этих случаях тип объекта, его структура определены и в ходе оптимизации остаются неизменными (сочлененная стрела, коробчатое сечение, рамный двухстоечный портал и т. д.). Методология решения таких задач будет рассмотрена далее.

Ко второму классу принадлежат задачи, в которых предмет оптимизации являются не только параметры, но и структура объекта. Их называют задачами структурной (структурно-схемной) оптимизации, например:

— выбор оптимального типа стрелового устройства для заданных условий (сочлененная стрела, прямая стрела с уравнительным полиспадом, прямая стрела с уравнительным блоком или еще какая-либо структура стрелового устройства);

— выбор оптимального типа металлической конструкции стрелы (коробчатая, трубчатая, шпренгельная и т. д.);

— выбор оптимального типа портала (рамный четырехстоечный, рамный двухстоечный, рамно-раскосный и т. д.).

На практике выработаны два принципиально различных подхода к решению задач структурно-схемной оптимизации — **метод последовательного исследования множеств** и **метод оптимального проектирования с автоматическим поиском схем**.

Согласно методу последовательного исследования множеств, вначале на основе имеющегося опыта отбирают ограниченное число перспективных структур объекта, каждая из которых может быть описана своей совокупностью параметров. Далее последовательно проводят параметрическую оптимизацию каждой структуры (исследуют множество вариантов, реализующих данную структуру). Наконец, полученные оптимальные варианты сравнивают между

собой и из них выбирают наилучший, принимая его за окончательное оптимальное решение задачи.

При автоматическом поиске схем вместо пространства параметров, описывающего известную конкретную структуру, вводят так называемое универсальное пространство параметров (УПП), в котором можно описать любую допустимую структуру — как известную, так и неизвестную. Параметрическая оптимизация, проводимая далее в этом УПП, является одновременно структурной оптимизацией, так как в результате решения мы получаем ответ на вопрос о наилучшей структуре оптимизируемого объекта. При этом могут быть получены и изобретательские (эвристические) решения. Способ задания УПП должен позволять описать любую допустимую форму, непрерывно переходить от одной схемы к другой, локально управлять изменением формы, оставляя часть ее неизменной.

Поясним это примером. Коробчатое сечение изгибаемой конструкции (рисунок 3.5, а) описывается четырьмя параметрами ( $X_1, \dots, X_4$ ), сечение трубы (рисунок 3.5, б) — двумя ( $X_5, X_6$ ), сечение на рисунке 3.5, в — шестью параметрами ( $X_1, \dots, X_6$ ), образующими УПП, которое охватывает конструкции коробчатого (рисунок 3.5, а), круглого (рисунок 3.5, б) и произвольного сечений. Заметим, что число параметров в УПП не обязательно должно быть равно сумме чисел параметров структур, объединяемых этим УПП.

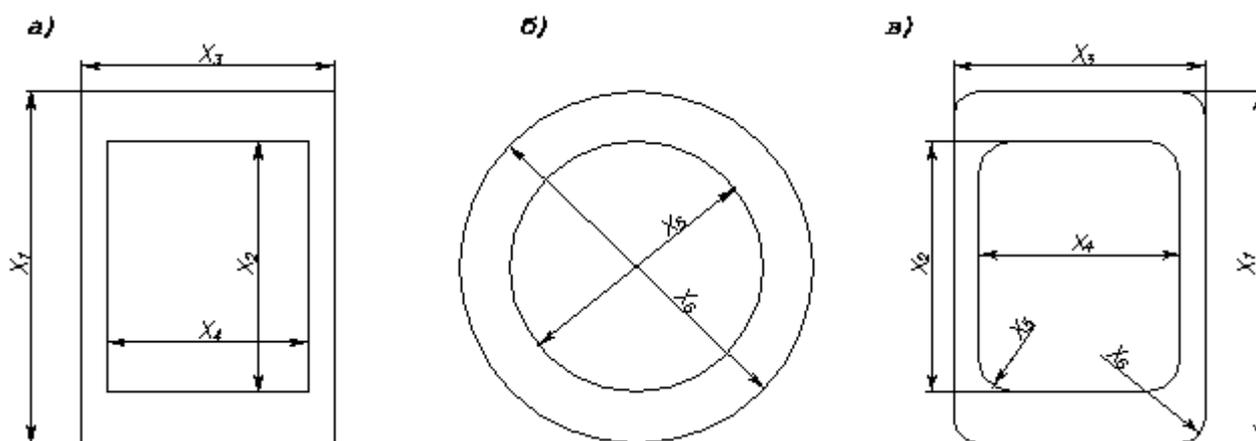


Рисунок 3.5 — Варианты описания замкнутых тонкостенных сечений

Если критерии качества (например, площадь сечения) и ограничения (например, условия прочности, включающие моменты сопротивления) выражены через  $X_1, \dots, X_6$  (рисунок 3.5, в), то найдя из решения задачи оптимизации оптимальные значения  $X_1, \dots, X_6$ , мы тем самым установим и оптимальную форму сечения, т. е. оптимальную структуру объекта. Так, если окажется, что в оптимальном случае  $X_5 = 0, X_6 = 0$ , то оптимальной формой будет коробчатое сечение. Сочетание  $X_4 = X_2 = 2X_5, X_1 = X_3 = 2X_6$  соответствует сечению круглой трубы.

В более сложных случаях применение метода, основанного на УПП, сопряжено с большими техническими трудностями и, в частности, требует большого объема памяти компьютера.

При оптимальном проектировании подъемно-транспортных машин и их узлов более перспективным представляется метод последовательного исследования множеств. Для формирования множества вариантов объекта, на котором производится поиск оптимального решения, необходимо правильно разработать и учесть различные ограничения. Они могут быть записаны в виде системы уравнений

$$h_k(X) = 0, k = 1, 2, \dots, K, \quad (3.1)$$

или неравенств

$$d_l(X) \geq 0, l = 1, 2, \dots, L, \quad (3.2)$$

а также ограничений сверху и снизу

$$X_i^{(U)} \geq X_i \geq X_i^{(M)}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (3.3)$$

Введение ограничений позволяет учесть реальные условия изготовления и функционирования объекта оптимизации, чтобы оптимизация была физически осуществима. Задача общего вида — минимизировать  $q(X)$  при ограничениях (3.1)–(3.3) — называется *условной оптимизацией*. Задача, в которой нет ограничений, называется оптимизационной задачей без ограничений, или *безусловной оптимизацией*.

Задачи оптимизации можно классифицировать в соответствии с видом функций  $q$ ,  $h_k$ ,  $d_l$  и размерностью вектора  $X$ . Задачи без ограничений, в которых  $X$  представляет собой одномерный вектор, называются задачей с одной переменной и составляют простейший подкласс оптимизационных задач. Задачи условной оптимизации, в которых функции  $h_k$  и  $d_l$  являются линейными, носят название задач с линейными ограничениями. В таких задачах целевые функции могут быть либо линейными, либо нелинейными. Задачи, которые содержат только линейные функции вектора непрерывных переменных  $X$ , называются задачами *линейного программирования*. В задачах целочисленного программирования компоненты вектора  $X$  должны принимать только целые значения.

Задачи с нелинейной целевой функцией и линейными ограничениями иногда называют задачами *нелинейного программирования с линейными ограничениями*. Оптимизационные задачи такого рода можно классифицировать на основе структурных особенностей нелинейных целевых функций — задачи квадратичного, дробно-линейного программирования и т. д.

Деление оптимизационных задач на классы представляет значительный интерес, поскольку специфические особенности тех или иных задач играют важную роль при разработке методов их решения. Применение методов линейного программирования оказалось плодотворным для различных задач оптимального управления нединамическими системами (оптимальное размещение оборудования, организация транспортных потоков и др.). При решении задач

оптимального проектирования специальных кранов используются аналитические методы и отдельные методы нелинейного программирования.

### 3.4 Критерии качества проектных решений

**Критерий качества** — это функция параметров, характеризующая определенное существенное свойство объекта оптимизации. Применительно к любому варианту, фигурирующему в процессе поиска оптимального решения, необходимо уметь вычислять значения критериев качества и тем самым количественно измерять качество вариантов в определенном смысле. Критерии качества могут быть заданы либо аналитическим выражением, либо замкнутым алгоритмом определения.

Состав одновременно учитываемых требований к подъемно-транспортным машинам и их узлам весьма обширен и разнообразен, поэтому задачи оптимального проектирования в подъемно-транспортном машиностроении — это, как правило, многокритериальные задачи. Например, при выборе варианта схемы шарнирно-сочлененного стрелового устройства порталного крана необходимо учитывать следующие показатели:

— геометрические (например, отклонение траектории груза от горизонтали при изменении вылета);

— кинематические (ускорение конца хобота при установившемся движении механизма изменения вылета);

— нагрузочные (характерные значения грузового неуравновешенного момента);

— показатели массы (масса показателей стрелового устройства и стрелового устройства в целом);

— энергетические (например, затраты энергии при работе механизма изменения вылета);

— стоимостные (себестоимость изготовления);

— экономические (приведенные затраты в сфере изготовления и в сфере эксплуатации).

В некоторых случаях в аналитические выражения для критериев качества входят накладываемые на параметры ограничения. Найти решение, оптимальное одновременно по всем показателям, в большинстве случаев невозможно. Решение, обращающее в минимум (максимум) один какой-то показатель, как правило, не обращает в минимум (максимум) другие. Поэтому приходится выбирать какой-то один критерий качества, являющийся для нас важнейшим. Такой критерий качества, характеризующий важнейшее свойство объекта, принимают за целевую функцию при оптимизации. Цель оптимизации — найти параметры  $\vec{X}$  объекта, обеспечивающие экстремум целевой функции  $q$ , т. е.

$$X \approx \max q \text{ или} \quad (3.4)$$

$$X \approx \min q. \quad (3.5)$$

Характер экстремума зависит от постановки задачи. Так, форма (3.4) относится к оптимизации по условию максимума, например, зачерпывающей способности грузочного устройства, а форма (3.5) — к оптимизации параметров конструкции из условия минимума, например, ее массы.

В современных условиях решающая роль принадлежит экономическим требованиям, поэтому за целевую функцию при наиболее полной постановке задачи следует принимать экономический критерий качества. Одни и те же требования могут быть достигнуты с помощью различных вариантов научно-технических решений при разных затратах общественного труда. В таких случаях решающим для оценки их целесообразности становится экономический эффект, оцениваемый как стоимость совокупной конечной общественной продукции за определенный период времени.

Отметим, что в иерархии требований к объектам и соответствующих критериев качества выше экономических стоят социальные требования. Египетская пирамида считалась оптимальной не при минимуме, а при максимуме затрат материалов и человеческого (рабского) труда на возведение этого символа величия фараона. Лестницы на подъемных сооружениях прокладывают не по кратчайшей, а по наиболее удобной и безопасной трассе.

Экономический критерий качества целесообразно принимать за целевую функцию в двух случаях:

1) когда экономические показатели объекта не могут быть определены с достаточной точностью из-за отсутствия необходимых данных, что часто имеет место на стадии эскизного и технического проектирования, когда для новых машин и должны определяться их оптимальные структура и параметры;

2) если у составляемых при оптимизации вариантов значения экономического критерия качества различаются в пределах точности их определения.

Существует два способа разрешения таких противоречий. Первый способ состоит в том, чтобы принять за целевую функцию технический показатель, который в условиях сравнения вариантов может быть признан косвенным показателем экономического эффекта. Таким показателем для параметрической оптимизации крановых металлических конструкций (стрел, мостов, башен и т. д.) часто оказывается их масса. Многочисленными исследованиями установлено, что при прочих равных условиях (фиксированных генеральных размерах кранов, марке материала, технологии изготовления) себестоимость изготовления металлических конструкций можно считать пропорциональной их массе. При структурной оптимизации такой подход является некорректным, поскольку сопоставляемые варианты предполагают различную технологию изготовления и имеют различные удельные (на единицу массы) трудоемкости изготовления.

Второй способ заключается в разработке *комплексного критерия качества*, который представляет собой выражение вида

$$q = \sum_{i=1}^p \alpha_i q_i, \quad (3.6)$$

где  $q_i$  — частные критерии качества (единичные показатели эффективности);  $p$  — число учитываемых частных критериев качества;  $\alpha_i$  — так называемый коэффициент весомости, отражающий важность, значимость  $i$ -го критерия качества, причем

$$q = \sum_{i=1}^p \alpha_i q_i = 1. \quad (3.7)$$

Частные показатели качества  $q_i$  целесообразно вводить в выражение (3.6) в безразмерном виде, т. е. определять по отношению к показателям базового варианта или машины-прототипа. Составление выражений целевой функции в форме (3.6) целесообразно лишь тогда, когда коэффициенты весомости  $\alpha_i$  назначены обоснованно, и теряет смысл, если они назначены произвольно.

Широко распространено определение коэффициентов весомости *методами экспертных оценок*. При этом рекомендуется выполнять следующие *правила*. Степень компетентности всех экспертов в вопросе оценки должна быть примерно одинакова. В состав экспертных комиссий не должны входить авторы изделия. Число экспертов требуется не менее семи, иначе велика вероятность принятия случайного решения. Не рекомендуется отбрасывать крайние оценки. Все эксперты должны работать независимо друг от друга по единой методике, чтобы результаты были сопоставимы.

Одним из способов обработки результатов экспертных оценок является *метод попарных сравнений*, описанный в разделе 2.1.2, который вызывает у экспертов меньше затруднений, чем ранжирование одновременно всех показателей. Составив номенклатуру одновременно учитываемых показателей качества, каждый из экспертов сравнивает попарно их значимость, признавая один из них более важным. Рассмотрим пример комплексной оценки порталных кранов этим методом, но с использованием другого варианта шкалы коэффициентов весомости, чем в разделе 2.1.2.

Обозначив через  $\alpha_i$  и  $\alpha_j$  коэффициенты весомости показателей  $q_i$  и  $q_j$ , построим матрицу  $W = \|\omega_{ij}\|$ , элементы которой имеют следующие значения

$$\begin{aligned} \omega_{ij} &= 0 \text{ при } \alpha_i \ll \alpha_j; \\ \omega_{ij} &= 1 \text{ при } \alpha_i < \alpha_j, \text{ но не } \alpha_i \ll \alpha_j; \\ \omega_{ij} &= 2 \text{ при } \alpha_i \approx \alpha_j; \\ \omega_{ij} &= 3 \text{ при } \alpha_i > \alpha_j, \text{ но не } \alpha_i \gg \alpha_j; \\ \omega_{ij} &= 4 \text{ при } \alpha_i \gg \alpha_j. \end{aligned}$$

При этом очевидно

$$\begin{aligned} \omega_{ij} + \omega_{ji} &= 4; \\ \omega_{ii} &= \omega_{jj} = 2; \\ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \omega_{ij} &= 2p^2; \end{aligned}$$

где  $p$  — число показателей. Коэффициент весомости  $i$ -го показателя вычисляется по формуле

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^p \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \omega_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^p \omega_{ij}}{2p^2}, \quad (3.8)$$

где сумма в числителе берется по элементам  $i$ -й строки матрицы. При этом

$\alpha_i = 1/p$  при средней значимости показателя  $q_i$ ;

$\alpha_i < 1/p$  при его значимости ниже средней;

$\alpha_i > 1/p$  при его значимости выше средней.

Число показателей, учитываемых при сравнении вариантов, не должно быть слишком велико, в противном случае коэффициенты весомости отдельных показателей приближаются к среднему значению  $\alpha_{CP} = 1/p$ . Рекомендуется значение  $p \leq 7$ .

Ниже показано определение коэффициентов весомости по изложенному методу для показателей сочлененных и прямых стрел грейферных порталных кранов. Здесь  $m_{CY}$  — масса стрелового устройства (стрелы, оттяжки, хобота, канатов, блоков);  $K_{\mathcal{E}}$  — энергетический показатель, пропорциональный затратам энергии при работе механизма изменения вылета;  $L$  — длина грузовых канатов в зоне стрелового устройства;  $M$  — наибольшее значение грузового неуравновешенного момента;  $\omega$  — соотношение скоростей горизонтального перемещения конца хобота при установившемся движении изменения вылета от наибольшего до наименьшего.

Заготовим таблицу по форме таблицы 3.1 для квадратной матрицы  $W$ , которую предстоит заполнить. Всем элементам главной диагонали матрицы ( $i = j$ ) присваиваем значение, равное двум ( $\omega_{ij} = 2$ ), так как любой показатель равноценен по важности самому себе. Показатель  $m_{CY}$  с позиции, например, инженера-конструктора завода-изготовителя является более важным, чем грузовой неуравновешенный момент, поэтому в 4-й клетке 1-й строки эксперт записывает  $\omega_{14} = 4$  и в 1-й клетке 4-й строки  $\omega_{41} = 0$ .

По сравнению с показателем  $K_{\mathcal{E}}$ , масса также представляется более важным критерием, однако  $K_{\mathcal{E}}$  прямо связан с экономичностью работы крана, поэтому  $\omega_{13} = 3$  и  $\omega_{31} = 1$ . Поступая далее подобным образом, эксперт заполняет всю таблицу и затем вычисляет искомые коэффициенты весомости (таблица 3.2). Таким образом, при сопоставлении вариантов стрелового устройства надлежит пользоваться комплексным показателем вида

$$q = 0,34m_{CY} + 0,28K_{\mathcal{E}} + 0,2L + 0,12M + 0,06\omega.$$

Таблица 3.1

<i>i</i>	Показатели	<i>j</i>				
		1	2	3	4	5
1	$m_{cy}$	2	3	4	4	4
2	$K_{\text{Э}}$	1	2			
3	$L$	0		2		
4	$M$	0			2	
5	$\omega$	0				2

Таблица 3.2

<i>i</i>	Показатели	<i>j</i>					$\sum_{j=1}^p = \omega_{ij}$	$\alpha_i$
		1	2	3	4	5		
1	$m_{cy}$	2	3	4	4	4	17	0,34
2	$K_{\text{Э}}$	1	2	3	4	4	14	0,28
3	$L$	0	1	2	3	4	10	0,2
4	$M$	0	0	1	2	3	6	0,12
5	$\omega$	0	0	0	1	2	3	0,06

Эксперт, связанный не с проектированием и изготовлением, а с эксплуатацией крана, по-видимому, иначе оценит сравнительную значимость конкретных показателей и получит иные коэффициенты весомости. Окончательный вид показателя  $q$  может быть составлен с учетом мнений всех экспертов.

Для комплексной оценки качества подъемно-транспортных машин в целом используют также интегральный показатель качества, равный отношению суммарного полезного эффекта  $\Pi_4$  от использования крана к приведенным затратам. Например, для перегрузочных порталных кранов

$$J = m_1 \Pi_4^{m_2} K_{\Gamma}^{m_3} / M^{m_4} N_{\text{Д}}^{m_5},$$

где  $\Pi_4$  — часовая производительность;  $K_{\Gamma}$  — коэффициент готовности, представляющий собой среднее относительное время пребывания машин в работоспособном состоянии в предельном стационарном режиме эксплуатации;  $M$  — масса крана;  $N_{\text{Д}}$  — общая мощность двигателей;  $m_1 = 0,24$ ;  $m_2 = 0,972$ ;  $m_3 = 0,685$ ;  $m_4 = 0,522$ ;  $m_5 = 0,025$ . Показатель  $m_2$  по абсолютному значению наибольший из  $m_2 \dots m_5$ , т. е. при оптимальном проектировании перегрузочных кранов важнейшими являются параметры, изменение которых в наибольшей степени влияет на производительность крана.

### ***Задача об оптимизации марки материала для крановой стрелы***

Масса оптимально спроектированной коробчатой стрелы обратно пропорциональна корню из допускаемого напряжения  $[\sigma]$  (это доказано ниже). С увеличением  $[\sigma]$  масса стрелы  $m_c$  уменьшается (рисунок 3.6, кривая 1), ее наименьшее значение будет при наибольшем рассматриваемом  $[\sigma]$ . Но здесь не учтено дополнительное нагружение стрелы деформационным моментом.

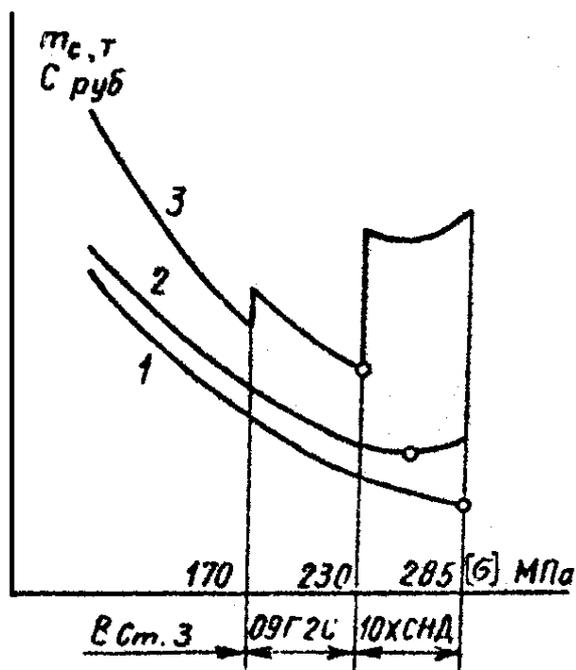


Рисунок 3.6 — Кривые зависимости стоимости металла от его марки

С учетом этого дополнительно-го нагружения получим изменение массы по кривой 2, часто имеющей минимум при некотором  $[\sigma]$ . Наконец, различные значения  $[\sigma]$  требуют различных марок стали (Ст3, 09Г2С, 10ХСНД), различающихся по стоимости за тонну.

Кривая 3 (стоимость конструкции  $C$ ) не будет непрерывной, при этом наименьшее значение стоимости не совпадает по  $[\sigma]$  ни с минимумом массы по кривой 2, ни с наименьшим значением массы по кривой 1. Как видно из графиков, оптимальной по стоимости будет стрела из стали 09Г2С.

Можно сформулировать следующие положения:

- 1) критерии качества с изменением параметров объекта могут изменяться как непрерывно, так и дискретно;
- 2) в зависимости от постановки задачи оптимизации и выбранной целевой функции могут быть получены разные оптимальные решения, т. е. разные значения оптимальных параметров.

### 3.5 Ограничения при поиске оптимального проектного решения

Для формирования множества вариантов объекта, на котором производят поиск оптимального решения, необходимо правильно разработать и учесть различные ограничения. Ограничения математически выражают те или иные связи, наложенные на объект оптимизации, и могут быть записаны в виде равенства

$$\varphi = 0 \quad (3.9)$$

или в виде неравенства

$$\varphi < 0, \varphi > 0 \quad (3.10)$$

или в виде нестрогого неравенства

$$\varphi \leq 0, \varphi \geq 0, \quad (3.11)$$

где  $\varphi$  — некоторая функция от параметров, которая так же, как и критерии качества, может быть задана либо аналитическим выражением, либо замкнутым алгоритмом определения.

Введение ограничений позволяет учесть реальные условия изготовления и функционирования объекта оптимизации, чтобы она была физически осуществима.

**Ограничения на параметры** часто задают в виде диапазонов значений параметров либо в виде множества их дискретных значений, либо в форме строгих или нестрогих неравенств.

Так, при поиске оптимальной высоты  $h_0$  сечения коробчатой балки мостового крана необходимо ввести ограничение

$$\varphi = h_0 - [h] \leq 0,$$

где  $[h]$  — наибольшая высота балки, допустимая при условии вписывания крана в габариты строительной конструкции здания, где он должен работать, либо по условиям перевозки по железной дороге.

Для сочлененных стрел порталных кранов (рисунок 3.3, б) можно записать следующие ограничения на параметры

$$\varphi_1 = X_1 - \Delta R = 0; \quad (3.12)$$

$$\varphi_2 = X_3 - H \geq 0; \quad (3.13)$$

$$\varphi_3 = X_2 - R_1 \geq 0; \quad (3.14)$$

$$\varphi_4 = X_9 - A_1; \quad (3.15)$$

$$\varphi_5 = X_9 - A_2 \geq 0; \quad (3.16)$$

$$\varphi_6 = X_8 - D_1 \leq 0; \quad (3.17)$$

$$\varphi_7 = X_8 - D_2 \geq 0; \quad (3.18)$$

$$\varphi_8 = X_6 - \gamma \geq 0. \quad (3.19)$$

Здесь в ограничениях (3.12) и (3.13)  $\Delta R$  — диапазон изменения вылета,  $H$  — минимально необходимая высота подъема груза над корнем стрелы. Эти величины предписываются проектным заданием, и ограничения являются директивными. В ограничении (3.14)  $R_1$  — значение параметра  $X_2$ , минимально допустимое из условия размещения груза под стрелой. В парах ограничений (3.15)–(3.16) и (3.17)–(3.18) параметры  $X_9$  и  $X_8$  соотносятся с предельно допустимыми верхними и нижними значениями ( $A_1, A_2$ ) и ( $D_1, D_2$ ) соответственно. В ограничении (3.19)  $\gamma$  — минимально необходимое значение угла установки хобота из условия отклонения грузовых канатов от вертикали в плоскости качания стрелы. Ограничения (3.14)–(3.19) являются компоновочными (конструктивными) и записываются на основе анализа существующих машин и опыта проектирования и эксплуатации.

В приведенных примерах ограничения в виде равенства или неравенства, как правило, могут быть явно разрешены относительно тех или иных параметров. Часто встречаются ограничения, не разрешимые в явном виде относительно параметров. Примерами могут быть уравнения совместности дефор-

маций (например, канонические уравнения метода сил) при оптимизации статически неопределенных систем, условия замкнутости или условия проворачиваемости при оптимизации шарнирных механизмов и др.

### ***Ограничения по прочности при оптимизации коробчатых сечений крановых металлических конструкций***

Проектировочный расчет крановых конструкций обычно производят на прочность от наибольших нагрузок  $II$  расчетного случая по их расчетным комбинациям. Для стрел поворотных кранов принимают следующие комбинации нагрузок:

$II_a$  — вес конструкции, вес груза при коэффициенте динамичности  $\varphi_{II}$  (работает механизм подъема);

$II_{b1}$  или  $II_{b2}$  — вес конструкции, вес груза, грузовые канаты отклонены от вертикали на угол  $\alpha_{II}$  в плоскости качания стрелы в сторону увеличения вылета ( $II_{b1}$ ) или его уменьшения ( $II_{b2}$ ) (неустановившееся движение механизма изменения вылета);

$II_c$  — вес конструкции, вес груза, канаты отклонены от вертикали на угол  $\beta_{II}$  перпендикулярно плоскости качания стрелы (неустановившееся движение механизма поворота).

Ограничение по прочности для наихудшей из комбинаций  $II_a$ ,  $II_{b1}$  или  $II_{b2}$  имеет вид

$$\varphi_1 = M_{z1} / W_z + N_1 / F - [\sigma] \leq 0,$$

а для комбинации  $II_c$

$$\varphi_2 = M_{z2} / W_z + M_{y2} / W_y + N_2 / F - [\sigma] \leq 0,$$

где  $M_{z1}$ ,  $N_1$  — вертикальный изгибающий момент и сжимающая сила в сечении по наихудшей комбинации нагрузок в плоскости качания стрелы;  $M_{z2}$ ,  $N_2$  — вертикальный и горизонтальный изгибающие моменты и сжимающая сила по комбинации нагрузок, включающей боковые нагрузки;  $W_z$ ,  $W_y$ ,  $F$  — моменты сопротивления и площадь сечения;  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение.

В более полной постановке задачи вводят также ограничения по местной устойчивости поясов и стенок, в составе сечения учитывают ребра жесткости и вводят ограничения на их размещение и количество, предписывают соответствие толщин листов сортаменту и т. д.

***Ограничения на критерии качества*** обычно задаются в виде неравенств и относятся к критериям качества, дополнительно учитываемым при оптимизации по выработанной целевой функции. Примеры таких ограничений: по прогибу и времени затухания колебаний при оптимизации параметров крановых мостов, по отклонению траектории груза от горизонтали и грузовому неуравновешенному моменту при оптимизации стреловых систем кранов и т. д. В таких случаях иногда говорят, что дополнительные критерии качества переведены в разряд ограничений.

Каждое ограничение в виде равенства, накладываемое на параметры или критерии качества, уменьшает на единицу размерность задачи оптимизации, т. е. число параметров, определяемых из условия экстремума целевой функции. Если число параметров равно числу ограничений в виде равенства, то оптимизация сводится к решению системы ограничений относительно всех параметров. Если ограничения совместны, то решение существует, а если несовместны, то решения нет. Если число  $n$  параметров больше числа  $m$  независимых ограничений в виде равенства, то возможно оптимальное определение  $(n-m)$  параметров. Наконец, если число независимых ограничений в виде равенства превышает число параметров, то также возможна оптимизация, однако это является особым, не рассматриваемым здесь случаем и требует специальных подходов к формированию целевой функции.

### **3.6 Математическая модель объекта оптимизации**

Система параметров вместе с системой ограничений и критериев качества образует математическую модель объекта оптимизации.

Моделирование (т. е. представление явления в удобном для изучения виде) лежит в основе практически любой науки. Содержание понятия «модель», «моделирование» в различных сферах знаний весьма разнообразно. Однако есть и общее: модель в том или ином смысле, более или менее полно имитирует оригинал — моделируемый объект. Будем говорить, что объект «б» является моделью объекта «а» относительно некоторой системы «s» характеристик, если «б» строится (или выбирается) для имитации «а» по этим характеристикам. Здесь термин «объект» понимается в более широком смысле — объектами могут быть любые ситуации, явления, процессы.

Модель может быть построена как для изучения этих характеристик (исследовательские модели), так и для их непосредственного использования (рабочие модели — автопилот, протез и т. д.). Исследовательские модели можно условно разделить на экспериментальные (предметные) и теоретические. Теоретические (умозрительные) модели формулируются на языке определенной науки. В зависимости от характера этого языка можно говорить о математических, экономических, экономико-математических и других моделях.

В наших случаях умозрительная физическая модель представлена обычно схематическим чертежом и называется расчетной схемой (при динамических исследованиях динамической моделью) — это идеализированное отображение рассматриваемой системы, используемое при ее теоретическом исследовании и инженерных расчетах.

Важнейшим требованием к модели является требование ее адекватности изучаемому реальному объекту (процессу) относительно избранной системы его характеристик. Под этим обычно понимается:

1) правильное качественное описание объекта по выбранным характеристикам;

2) правильное количественное описание объекта по выбранным характеристикам с некоторой разумной точностью.

Применительно к подъемно-транспортным машинам и их узлам нужно обращать внимание на следующее. Ограничения на параметры, определяющие диапазоны их варьирования при оптимизации, должны быть установлены после анализа аналогичных отечественных и зарубежных изделий в возможно более полной номенклатуре. Это же касается отбора структур при структурно-схемной оптимизации.

Например, при установлении диапазонов значений параметров сочлененных стрел на кафедре транспортных и технологических систем СПбПУ были проанализированы данные о 14 типоразмерах порталных кранов отечественных и иностранных фирм последних лет выпуска и перспективные разработки промышленности. При установлении перспективных типов стреловых систем и порталов были изучены данные более чем 250 типоразмеров кранов. Перспективные схемы канатных подвесов груза, способствующих уменьшению раскачиваний груза, определены на основе анализа опыта промышленности, материалов литературных источников и более 200 патентов и авторских свидетельств.

Расчетные нагрузки, входящие в ограничения по прочности, должны назначаться с учетом данных о фактической нагруженности соответствующих узлов в реальных условиях эксплуатации. Так, нагрузки для расчета стрел порталных кранов задаются с учетом результатов эксплуатационных испытаний аналогичных кранов. Эти исследования в свое время были выполнены в шести портах на 11 кранах, при этом было сделано и обработано свыше 1,5 млн. замеров напряжений с помощью тензодатчиков. Исследование нагруженности кранов, тензометрические испытания их в условиях эксплуатации продолжаются и сегодня, что позволяет корректировать соответствующие методики расчета.

Ограничения на критерии качества (допускаемые прогибы и время затухания колебаний мостов и стрел, негоризонтальность траектории груза для стрел и т. д.) должны разрабатываться на базе подробного анализа реальных условий нормального функционирования объекта эксплуатации. Методика определения напряжений, принимаемая при формировании ограничений по прочности, должна быть подтверждена физическим экспериментом.

Остановимся подробнее на этом последнем обстоятельстве. В ограничениях  $\varphi_1 \leq 0$  и  $\varphi_2 \leq 0$  (см. раздел 3.5) при оптимизации сечений коробчатых стрел предполагается определение действующих напряжений по формулам сопротивления материалов. Между тем, эксперимент на металлических моделях и натурной конструкции показывает, что в углах сечения у шарнира стрела–рейка перенапряжения могут достигать 40%, а в середине пояса без отверстия наблюдаются провалы эпюры напряжений (рисунок 3.7). Учесть эти факторы можно с привлечением более совершенного аппарата теории упругости. Но такая постановка задачи значительно усложняет решение, и применять ее в ограничениях для оптимизации нецелесообразно по двум причинам:

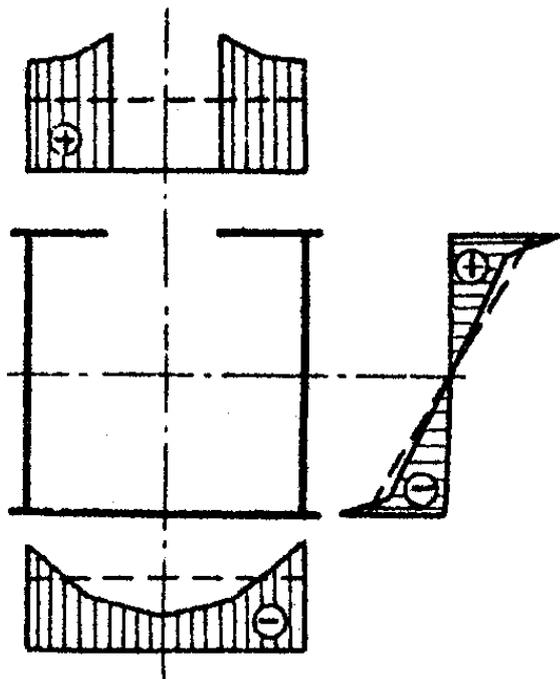


Рисунок 3.7 — Эпюры напряжений в сечении коробчатой балки

— во-первых, указанные особенности будут примерно в равной степени проявляться для всех вариантов, из которых будет выбираться решение;

— во-вторых, эти перенапряжения перекрываются коэффициентом запаса прочности.

Поэтому при оптимизации целесообразно ограничиться учетом основных, доминирующих факторов, а уточненные расчеты выполнять при необходимости на основе уже полученных параметров конструкции, придавая этим расчетам поверочный (а не проекторочный) характер.

Подчеркнем, что адекватность модели следует рассматривать только по определенным признакам, характеристикам, принятым в данном исследовании за основные. Если такие характеристики не указаны, то они должны подразумеваться. Не существует универсальной адекватности, ибо такая адекватность означала бы тождество модели и объекта.

Можно выделить следующие основные этапы разработки модели объекта при оптимизационных и других исследованиях:

1) изучение моделируемого явления, формулировка технических требований к объекту и на их основе — целей исследования (формулирование проблемы);

2) выявление факторов, влияющих на выполнение объектом технических требований, и воздействий, препятствующих или способствующих нормальному функционированию;

3) построение концепции о поведении объекта в соответствии с данными, полученными на 1-м и 2-м этапах на основе анализа имеющейся информации (технической документации и экспериментальных данных);

4) составление как можно более полной структуры объекта в соответствии с разработанной на 3-м этапе концепцией;

5) разбиение структуры на подсистемы (блоки), поддающиеся элементарной количественной оценке известными методами, и вычисление соответствующих характеристик (декомпозиция);

6) сравнительный анализ характеристик подсистем с точки зрения технических требований, целей исследования и разработанной концепции, принятие решений о значении отдельных подсистем с указанной точки зрения, о воз-

возможности исключения отдельных подсистем или об объединении нескольких подсистем в эквивалентную подсистему (агрегатирование);

7) математическое описание агрегатированной структуры — разработка математической модели объекта;

8) оценка адекватности модели.

При решении задач оптимизации специальных машин должны применяться основные принципы системного подхода, которые сводятся к целенаправленности (цель работы — обеспечение эффективности функционирования машины), относительности (при расчетах каждый элемент рассматривается как часть цельного), моделируемости.

Системой называется совокупность, образованная (и упорядоченная по определенным правилам) из конечного множества элементов. При этом между элементами системы существуют определенные отношения. Элемент и система являются относительными понятиями. Например, грузоподъемный кран — это система, образованная своими элементами, в то же время он может быть элементом порта, системы «человек–машина–окружающая среда».

Для выяснения связи между элементами крана рассмотрим его динамическую модель, как наиболее общую. Структура динамической модели может быть показана с помощью графа (схемы). Будем использовать неориентированные графы, структура которых аналогична структуре исследуемой модели. Граф состоит из элементов системы, изображаемых окружностями, связанными между собой дугами, которые означают, что элементы системы имеют между собой связь. Эта связь может осуществляться за счет сил упругости, инерции, в связь могут быть включены элементы демпфирования. Над дугами могут быть графические символы, указывающие вид связи. Этот вид графа позволяет графически иллюстрировать динамическую модель с любой степенью дискретизации и делать качественные выводы о характере связей между элементами системы. Пример графа динамической модели грузоподъемных кранов приведен на рисунке 3.8.

Кран с грузом на гибком подвесе в общем случае представляет собой компоновочно-конструктивное объединение ряда подсистем-двигателей, передаточных механизмов, металлической конструкции, грузозахватного устройства. Каждую из указанных подсистем можно разбить на более мелкие блоки, которые имеют различные конструктивные исполнения. Такие подсистемы часто проектируются, исследуются и испытываются отдельно (с учетом, безусловно, компоновочных связей). Характеристики каждой из подсистем крана можно определять расчетным или экспериментальным путем. Получение таких характеристик значительно проще, чем для целого крана.

Если не изучаются процессы взаимодействия грузозахватного органа (ГЗ) и перегружаемого груза (Г) (взаимодействия грейфера и перегружаемого материала, электромагнита и груза), то узлы ГЗ и Г на рисунке 3.8 могут быть объединены.

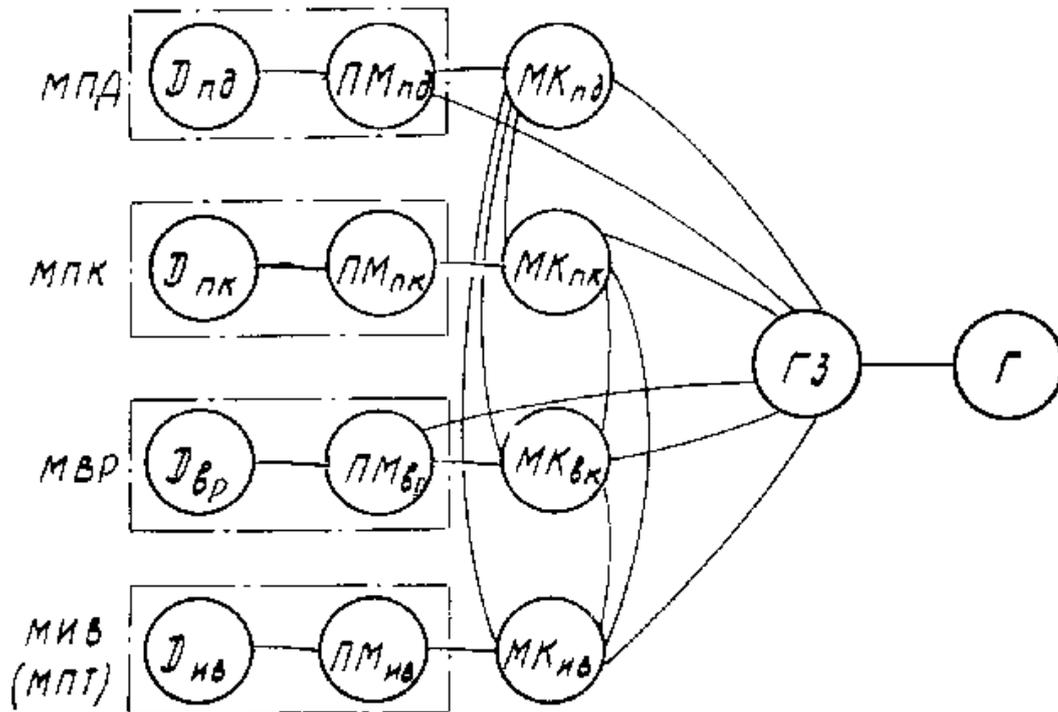


Рисунок 3.8 — Динамический граф грузоподъемных кранов

Будем рассматривать кран, имеющий четыре механизма: механизм подъема (МПД), механизм передвижения крана (МПК), механизм вращения крана (МВР), механизм изменения вылета (МИВ) или механизм передвижения тележки (МПТ). В этом случае кран будет иметь четыре степени подвижности.

Двигатели являются теми функциональными частями машины, в которых происходят процессы преобразования энергии. В любом двигателе можно выделить входные параметры, управляющие этими процессами, и выходное звено, совершающее обычно вращательное движение.

Структура крана (кранового механизма) существенно зависит от характера соединения двигателей. Для крановых механизмов наибольшее распространение имеют однодвигательные агрегаты, в которых используются двигатели с одним входным параметром. В многодвигательных машинах или механизмах двигатели могут устанавливаться независимо или связываться между собой по выходу или входу.

При связи двигателей по выходу соединяют выходные звенья нескольких двигателей (например, лебедки механизма подъема литейных кранов). Чаще всего эта схема используется для повышения надежности работы механизма. В этом случае с функциональной точки зрения получают двигатель с одним выходом и несколькими входами.

Связь двигателей по входу осуществляется обычно в виде «электрического вала», обеспечивающего либо строгую синхронизацию движений выходных звеньев, либо выравнивание обобщенных движущих сил (например, механизмы передвижения кранов мостового типа с большими пролетами).

Кран (граф которого показан на рисунке 3.8) является примером многодвигательной машины с независимыми двигателями. В этом случае динамическая связанность двигателей осуществляется через приводимую в движение машину. Так, при работе механизма вращения крана груз отклоняется и в плоскости стреловой системы и нагружает двигатель механизма изменения вылета.

Механическая часть крана состоит из передаточных механизмов (ПМ) и металлоконструкции (МК). Это разбиение представляется удобным как с точки зрения анализа и синтеза крана, так и с точки зрения проектирования. Функционально механическая часть крана служит для преобразования движений выходных звеньев двигателей в движения исполнительных органов, служащих для перемещения точки подвеса груза на канатах (мост крана, стрела, барабан), необходимого для выполнения рабочих процессов (перемещение груза, черпание материала грейфером).

ПМ предназначен для передачи движения от двигателя к МК крана (от двигателя к колесам крана, от двигателя к стреле) или непосредственно к исполнительному органу (барабану механизма подъема). Он может быть связан с металлоконструкцией как жесткой, так и гибкой связью (полиспастный механизм изменения вылета, механизм передвижения с канатной тягой).

Двигатель (Д) и ПМ образуют крановый механизм в обычном понимании. Механизм и часть металлической конструкции крана образуют ряд крановых подсистем: подъема (СПД), передвижения крана (СПК), вращения крана (СВР), изменения вылета (СИВ) или передвижения тележки (СПТ).

Идея выделения крановой МК в отдельную подсистему состоит в том, что при работе различных механизмов динамический отклик получают отдельные части МК. Этот вопрос тесно связан с расчетными комбинациями нагрузок, по которым в настоящее время в большинстве случаев ведется проекторочный расчет. В зависимости от того, какой механизм работает, возможны различные степени детализации крановой МК.

Представление модели крана в виде графа позволяет в наглядной форме вскрыть структурные особенности системы и сделать продуктивные выводы о качественных особенностях процесса.

### **3.7 Методы оптимизации**

Параметры, соответствующие экстремуму целевой функции при выполнении ограничений, находят с помощью какого-либо метода вычислительной (прикладной) математики. Эти методы разделяют на две большие группы:

- 1) аналитические методы (прямое исследование целевой функции на экстремум, метод множителей Лагранжа, метод вариационного исчисления);
- 2) численные методы, когда оптимальные параметры определяют с помощью некоторой итерационной процедуры (последовательными приближениями).

Ввиду сложности целевых функций и ограничений, в инженерных задачах оптимизации наибольшее применение находят численные методы. Среди них следует выделить:

1) методы нелинейного программирования, разработанные для нелинейных целевых функций при линейных и (или) нелинейных ограничениях;

2) методы линейного программирования, разработанные для линейных целевых функций при линейных ограничениях.

Слово «программирование» в этих определениях не означает «составление вычислительных программ». Рассмотрим аналитическое решение некоторых задач оптимизации и отдельные методы нелинейного программирования.

### 3.7.1 Аналитические методы

#### *Прямое исследование целевой функции на экстремум*

Рассмотрим задачу об оптимальных параметрах коробчатого сечения балки, работающей на изгиб. Пусть требуется определить значения оптимальных параметров  $h$ ,  $b$ ,  $\delta_{II}$ ,  $\delta_C$  коробчатого сечения (рисунок 3.2, а), обеспечивающие минимум его площади при выполнении ограничений по прочности, поясненных в разделе 3.5

$$\varphi_1 = M_{z1} / W_z - [\sigma] = 0;$$

$$\varphi_2 = M_{z2} / W_z + M_{y2} / W_y - [\sigma] = 0.$$

Целевая функция имеет вид

$$q = 2 (h\delta_C + b\delta_{II}).$$

Из условия  $\varphi_1 = 0$  имеем

$$W_z = M_{z1} / [\sigma].$$

Подставив в это выражение  $\varphi_2 = 0$ , найдем

$$W_y = \frac{M_{y2} M_{z1}}{(M_{z1} - M_{z2})[\sigma]}.$$

Имеем задачу о минимизации площади  $q$  коробчатого сечения при заданных моментах сопротивления  $W_z$  и  $W_y$ . Имея в виду, что

$$W_z = h(b\delta_n + h\delta_C / 3),$$

$$W_y = b(h\delta_C + b\delta_n / 3)$$

(без учета свесов поясов), можно получить

$$q = 1,5 ( W_z/h + W_y/b ).$$

Найдем  $h$  и  $b$ , обеспечивающие экстремум  $q$

$$\partial q / \partial h = 0; -1,5W_z/h^2 = 0; h = \infty;$$

$$\partial q / \partial b = 0; -1,5W_y/b^2 = 0; b = \infty;$$

$$\delta_c = \frac{9W_y}{8hb} - \frac{3W_z}{8h^2} = 0;$$

$$\delta_n = \frac{9W_z}{8hb} - \frac{3W_y}{8b^2} = 0.$$

Таким образом, теоретический оптимум достигается при поясах и стенках, имеющих бесконечные размеры и нулевые толщины. Этот парадоксальный результат получился потому, что в систему ограничений не были включены ограничения по местной устойчивости. Для отыскания реального оптимума зафиксируем толщину стенки по условиям местной устойчивости, не рассматриваемым здесь подробно, или по технологическим соображениям. Тогда

$$q = 2W_z/h + 4h\delta_c/3;$$

$$\partial q / \partial h = 0;$$

$$h = \sqrt{3W_z/2\delta_c}.$$

При этом значении  $h$  можно получить для оптимального случая из ограничений  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = 0$

$$b\delta_n = \frac{h\delta_c}{3};$$

$$b = \frac{3W_y}{5W_z} \sqrt{\frac{3W_z}{2\delta_c}};$$

$$\delta_n = \frac{5W_z}{9W_y} \delta_c.$$

При этом достигается минимум площади сечения, равный

$$q_{\min} = 3,27 \sqrt{W_z \delta_c}.$$

Рассмотрим *задачу об оптимальной форме статически неопределимой балки*. Требуется определить оптимальную форму (распределение материала по длине) дважды защемленной балки коробчатого сечения, нагруженной силой  $P$  в середине пролета (рисунок 3.9, а).

Если учесть симметрию нагружения симметричной балки и пренебречь влиянием продольных сил, то балка будет один раз статически неопределимой относительно моментов  $M$  в защемлениях.

Эпюра поперечных сил  $Q$ , приведенная на рисунке 3.9, б, не зависит от формы симметричной балки.

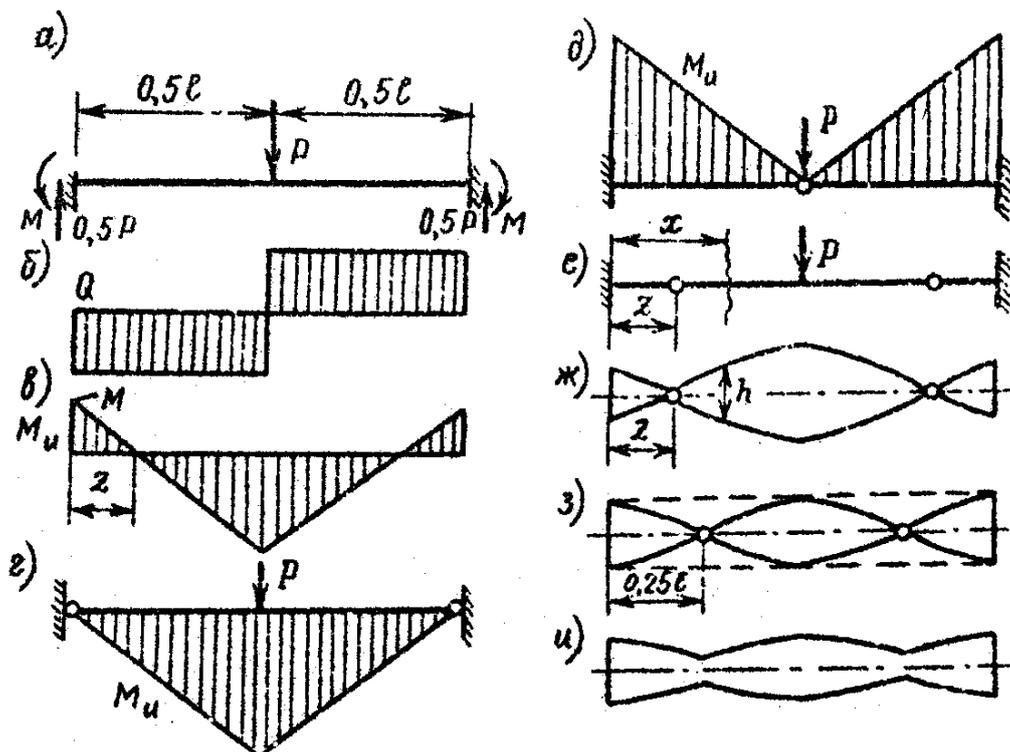


Рисунок 3.9 — К расчету оптимальной формы статически неопределимой балки

Эпюра изгибающих моментов (рисунок 3.9, а) будет состоять из двух прямолинейных участков, имеющих тангенсы углов наклона, равные  $Q = \pm 0,5P$ , и ординаты на концах, равные  $M$ . Значение моментов  $M$  зависит от формы балки и имеет пределы изменения от 0 (балка с шарнирными опорами на рисунке 3.9, г) до  $0,25PL$  (балка с шарниром в середине пролета на рисунке 3.9, д).

Эпюра на рисунке 3.9, в характеризует наиболее общий случай. Эта эпюра вполне определяется координатой  $Z$  безмоментной точки. Величину  $Z$  примем за оптимизируемый параметр.

Совершенно очевидно, что из всех балок с эпюрой изгибающих моментов (рисунок 3.9, в) самой легкой будет балка, очертания которой максимально приближаются к форме равного сопротивления, т. е. статически определимая разрезная балка с двумя шарнирами в пролете (рисунок 3.9, е), причем расположение шарниров определяется координатой  $Z$ . На рисунке 3.9, ж показана оптимальная (по массе) форма такой балки. Высоту  $h$  в сечении с координатой  $X$  можно найти из выражения для оптимальной высоты коробчатого сечения (см. выше)

$$h = \sqrt{3M_u / 2[\sigma] \delta_c},$$

причем абсолютная величина изгибающего момента равна

$$M_u = 0,5P(Z - X) \text{ при } 0 \leq X \leq Z;$$

$$M_u = 0,5P(X - Z) \text{ при } Z \leq X \leq 0,5L.$$

Минимальная площадь коробчатого сечения, нагруженного моментом  $M_u$ , равна

$$F = 3,27 \sqrt{M_u \delta_c / [\sigma]}.$$

Минимальный объем балки (целевую функцию для оптимизации параметра  $Z$ ) вычисляем с помощью выражения

$$\begin{aligned} V &= \frac{2 \cdot 3,27 \sqrt{0,5P\delta_c}}{\sqrt{[\sigma]}} \left[ \int_0^z \sqrt{z-x} dx + \int_z^{0,5L} \sqrt{x-z} dx \right] = \frac{2 \cdot 3,27 \sqrt{0,5P\delta_c}}{\sqrt{[\sigma]}} = \\ &= \left[ -\frac{2}{3} (z-x)^{3/2} \Big|_0^z + \frac{2}{3} (x-z)^{3/2} \Big|_z^{0,5L} \right] = K \left[ \frac{2}{3} z\sqrt{z} + \frac{2}{3} (0,5L-Z)^{3/2} \right] = \\ &= \frac{2K}{3} \left[ z\sqrt{z} + (0,5L-z)\sqrt{0,5L-z} \right] = \frac{2}{3} Kq. \end{aligned}$$

Найдем значение  $Z$ , обеспечивающее минимум объема  $V$

$$\partial q / \partial z = 0;$$

$$1,5\sqrt{z} - 1,5\sqrt{0,5L-z} = 0;$$

$$z = 0,25L.$$

Этому отвечает минимум объема балки, равный

$$V = \frac{2}{3} K 0,25L 2\sqrt{0,25L} = 0,167KL\sqrt{L}.$$

Оптимальная форма балки при  $Z = 0,25L$  приведена на рисунке 3.9, з. Такую же эпюру изгибающих моментов при  $Z = 0,25L$  имеет балка постоянного сечения, показанная на рисунке 3.9, з штриховой линией. Минимальный объем такой балки равен

$$V^* = 3,27L \sqrt{\frac{2PL\delta_c}{16[\sigma]}} = \frac{2 \cdot 3,27 \sqrt{0,5P\delta_c}}{\sqrt{[\sigma]}} \frac{L\sqrt{L}}{4} = \frac{KL\sqrt{L}}{4} = 1,5V,$$

т. е. в 1,5 раза больше, чем при оптимальной форме. Если учесть влияние поперечных сил, то форму балки следует откорректировать по рисунку 3.9, и.

Заметим, что подобный подход применим для отыскания оптимальных форм других видов статически неопределимых балок и рам (см. рисунок 3.2, а). Для рамы с двумя шарнирами в ригеле (рисунке 3.10, а) оптимизируемым параметром будет координата  $Z$  шарнира. В данном случае функция объема  $V(Z)$  в интервале  $0 \leq Z \leq 0,5L$  не имеет математического минимума, но имеет наименьшее значение.

Рама, показанная на рисунке 3.10, б, геометрически изменяема. На ее основе можно получить геометрически неизменяемую форму (показано штриховой линией на рисунке 3.10, б) и одновременно учесть влияние поперечных сил.

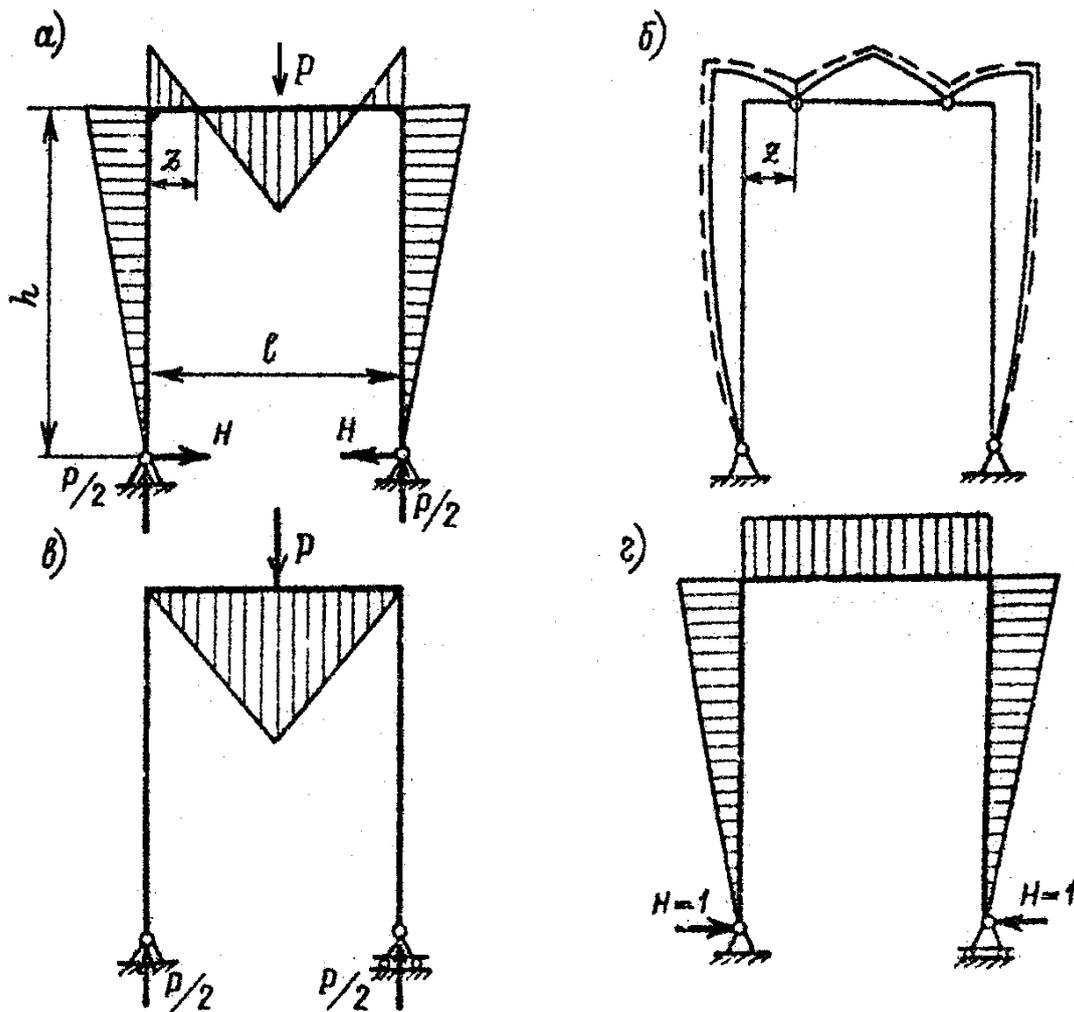


Рисунок 3.10 — К расчету статически неопределимой рамы

При этом для сохранения эпюры изгибающих моментов с координатой безмоментной точки необходимо удовлетворить каноническому уравнению метода сил

$$\delta_{11}H + \delta_{1P} = 0,$$

причем (рисунок 3.10, в, г)

$$\delta_{11} = \frac{2}{E} \int_0^h \frac{x^2 dx}{J_1(x)} + \frac{1}{E} \int_0^L \frac{h^2 dx}{J_2(x)};$$

$$\delta_{1P} = \frac{2}{E} \int_0^{0.5L} \frac{-0.5Phx dx}{J_2(x)};$$

$$H = \frac{Pz}{2h},$$

где  $J_1(x)$  и  $J_2(x)$  — функции изменения момента инерции сечения по длине стоек и ригеля.

Подставив значения  $\delta_{11}$ ,  $\delta_{1P}$  и  $H$  в каноническое уравнение, получим

$$\frac{P_z}{2h} = -\frac{\delta_{1P}}{\delta_{11}} = \frac{\frac{2}{E} \int_0^{0,5L} \frac{Phxdx}{2J_2(x)}}{\frac{2}{E} \int_0^h \frac{x^2 dx}{J_1(x)} + \frac{1}{E} \int_0^L \frac{h^2 dx}{J_2(x)}};$$

$$\frac{z}{2h} = \frac{Ph \int_0^{0,5L} \frac{xdx}{J_2(x)}}{2 \int_0^h \frac{x^2 dx}{J_1(x)} + \int_0^L \frac{h^2 dx}{J_2(x)}}.$$

Данное условие есть ограничение по равенству.

### 3.7.2 Методы нелинейного программирования

Общего метода решения нелинейных задач оптимизации пока не существует. Развитие нелинейного программирования сводилось к разработке частных алгоритмов, среди которых выделяются наиболее типичные.

На эффективность того или иного метода оптимизации в задачах нелинейного программирования оказывают влияние:

- вид целевой функции в окрестности экстремума и вообще в исследуемой области;
- размерность задачи (число оптимизируемых параметров);
- принятый шаг и диапазон изменения оптимизируемых параметров в ходе решения;
- требуемая точность определения оптимальных параметров.

Для рассмотрения некоторых известных методов поиска параметров, обеспечивающих экстремум (в дальнейшем для определенности — минимум) нелинейных целевых функций, введем понятие линий (поверхностей) уровня функции. Пусть имеется непрерывная функция двух переменных  $q = q(X_1, X_2)$  при ограничениях  $0 \leq X_1 \leq 4$ ,  $0 \leq X_2 \leq 4$ . Также, пусть известна таблица значений функции  $q$  (таблица 3.3).

Конечно, в реальных задачах подобная таблица никогда не бывает заранее известна, в противном случае оптимальные значения параметров можно было бы установить непосредственно по ее данным. В нашем примере (таблица 3.3) это  $X_1 = 2$ ,  $X_2 = 2$  (с точностью до целых),  $q_{\min} = q(2; 2) = 10$ .

Таблица 3.3

$X_1$	$X_2$	$q$	$X_1$	$X_2$	$q$	$X_1$	$X_2$	$q$	$X_1$	$X_2$	$q$	$X_1$	$X_2$	$q$
	0	15		0	13		0	13		0	15		0	17
	1	13		1	11		1	11,5		1	13		1	15
0	2	13,2	1	2	12	2	2	10	3	2	12	4	2	13
	3	15		3	13		3	12		3	11		3	12
	4	17		4	15		4	13		4	12,5		4	12

Пользуясь таблицей 3.3 и в необходимых случаях интерполяцией, построим кривые  $q = \text{const}$  в осях  $X_1, X_2$  (рисунок 3.11, а), представляющие собой условия связи между переменными, при выполнении которых функция  $q$  имеет определенное постоянное значение. Такие линии называют линиями уровня.

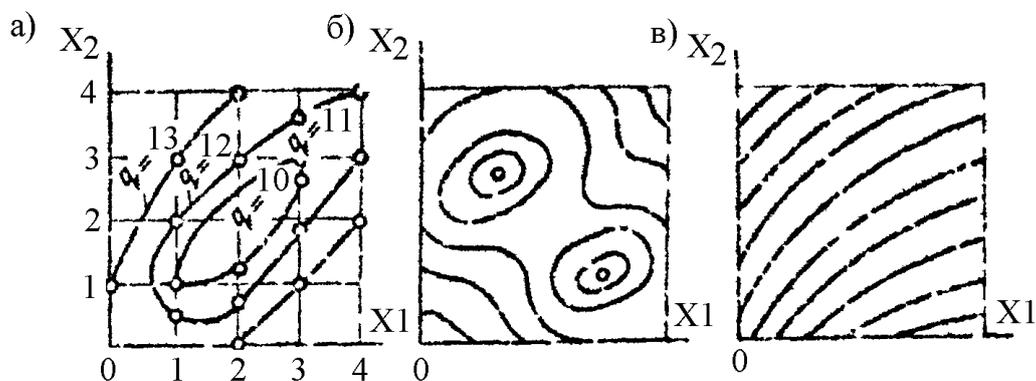


Рисунок 3.11 — Линии поверхностей уровня

Для функций трех переменных можно построить поверхности уровня  $q = \text{const}$  в осях  $X_1, X_2, X_3$ . При числе переменных более трех говорят о поверхностях уровня в многомерном пространстве (или о гиперповерхностях уровня). Если в исследуемой области функция имеет единственный экстремум, то поверхности уровня располагаются вокруг точки с координатами, отвечающими этому экстремуму (рисунок 3.11, а, таблица 3.3).

Функция с поверхностями уровня, подобными показанным на рисунке 3.11, б, имеет два локальных экстремума (в общем случае — несколько экстремумов), причем эти экстремальные значения функции, вообще говоря, не совпадают между собой, и действительным (глобальным) экстремумом является какой-то один. В зависимости от начальной точки выбранного вычислительного процесса и принятой стратегии поиска, мы найдем параметры, обеспечивающие либо глобальный экстремум, либо один из локальных, и для суждения о характере полученного результата нужны дополнительные исследования.

Наконец, если линии уровня в исследуемой области не замкнуты (рисунок 3.11, в), то это означает, что экстремум функции (точнее ее наибольшее или наименьшее значение, когда производные от функции по параметрам не обращаются в нуль) отвечает точке, лежащей на границе области.

Как уже отмечалось, форма поверхностей уровня обычно заранее не известна, если только она не ясна из физического смысла задачи или не исследовалась специально. Если данных о поведении функции в допустимой области нет, то поиск оптимальных параметров на компьютере ведут «вслепую». Понятны сопряженные с этим трудности и недостатки. Поэтому полезно, приступая к разработке алгоритма оптимизации, предварительно изучить поведение функции, выяснить форму поверхностей уровня и по возможности понять физические причины, лежащие в основе этих обстоятельств.

Ниже рассматриваются некоторые типовые методы поиска экстремума нелинейной функции. Следует еще раз подчеркнуть, что ни один из них не является универсальным. Поэтому в практике оптимального проектирования конструкций подъемно-транспортных и строительных машин иногда удается применить эти типовые алгоритмы, но нередко приходится разрабатывать специальные алгоритмы оптимизации, отвечающие конкретным особенностям объектов, целевых функций и ограничений. Примерами таких специальных алгоритмов являются разработанные на кафедре транспортных и технологических систем СПбПУ алгоритмы оптимизации параметров коробчатых сечений стрел и хоботов порталных кранов, включающих ребра жесткости, алгоритмы оптимального проектирования металлических конструкций балочных и шпренгельных стрел, порталов, стрел одноковшовых экскаваторов и др.

### ***Метод перебора на координатной сетке***

Метод проиллюстрирован на рисунке 3.12. Разделив принятые интервалы изменения всех параметров на некоторое число частей, определяют значения целевой функции при всех возможных сочетаниях значений каждого из параметров (т. е. во всех узлах координатной сетки) и выбирают из них то, которое для достаточно гладкой функции и при достаточно малом шаге изменения переменных будет близко к искомому экстремуму.

Метод не требует предварительной информации о поведении функции. Недостаток метода — необходимость весьма большого числа измерений функций во всех узлах координатной сетки. Если интервалы изменения каждого из параметров разделены на  $n$  частей, то общее число измерений составит  $n^m$ , где  $m$  — размерность задачи. Известно применение этого метода для минимизации массы пролетного строения козлового крана, где процесс оптимизации пяти параметров на компьютере занял примерно два часа.

Метод перебора может быть рекомендован для предварительного изучения изменчивости и сходимости целевой функции по параметрам в исследуемой области.

### ***Метод локального поиска на координатной сетке***

Метод проиллюстрирован на рисунке 3.13. В начальной точке определяют значение функции. Затем все  $m$  параметров увеличиваются и уменьшаются на заданные малые числовые величины. В результате этого получают  $2m$  вариантов, лучший из которых принимают в качестве исходного для следующей итерации. Локальный поиск позволяет резко сократить число измерений функции по сравнению с методом перебора. При наличии нескольких локальных экстремумов метод приводит к одному из них в зависимости от выбранного начального приближения.

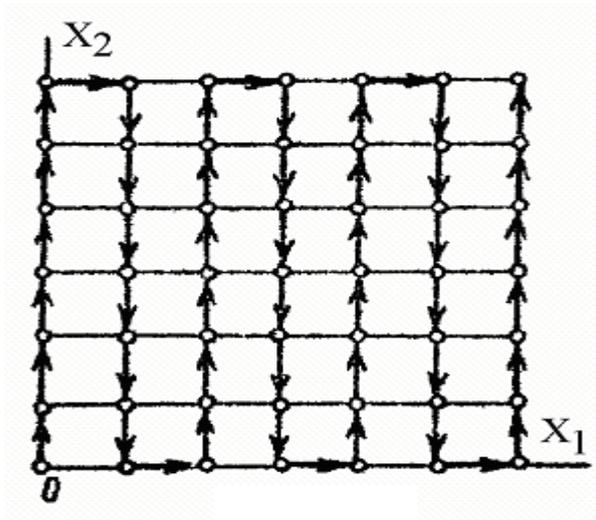


Рисунок 3.12 — Метод перебора по координатной сетке

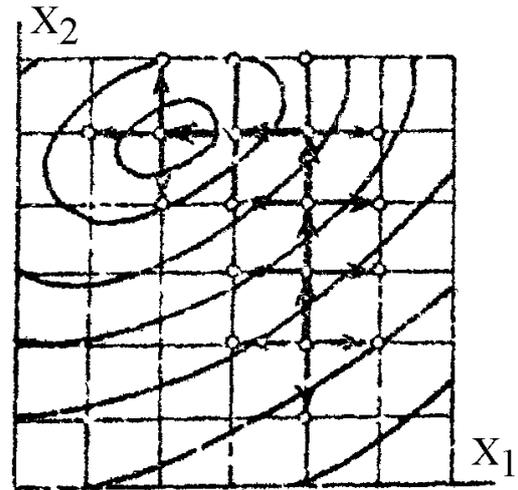


Рисунок 3.13 — Поиск по координатной сетке

### Градиентный метод

Градиентом функции называют вектор, проекции которого на координатные оси равны частным производным функции по соответствующим координатам. Для функции трех переменных

$$\vec{grad} q = \frac{\partial q}{\partial X_1} \vec{i} + \frac{\partial q}{\partial X_2} \vec{j} + \frac{\partial q}{\partial X_3} \vec{k},$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  — единичные векторы, ориентированные по соответствующим осям.

Из векторной алгебры известно, что градиент скалярной функции направлен в сторону наискорейшего увеличения функции и что он ортогонален поверхности уровня, проходящей через данную точку. Вектор, противоположный градиенту (антиградиент), направлен в сторону наискорейшего уменьшения функции.

Рассмотрим для определенности оптимизацию целевой функции  $q$  по градиентному методу (рисунок 3.14). В начальной точке численно определяют частные производные целевой функции

$$\frac{\partial q}{\partial X_i} \cong \frac{q(X_i + \Delta_i) - q(X_i)}{\Delta_i},$$

где  $\Delta_i$  — малое приращение параметра  $X_i$ . Затем выполняют шаг по антиградиенту, т. е. значения параметров в следующей итерации принимают согласно зависимостям

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} - \theta_i \left( \frac{\partial q}{\partial X_i} \right)^{(t)},$$

где  $t$  — номер последней итерации;  $i = 1, \dots, m$ ;  $m$  — число параметров;  $\theta_i$  — коэффициент пропорциональности.

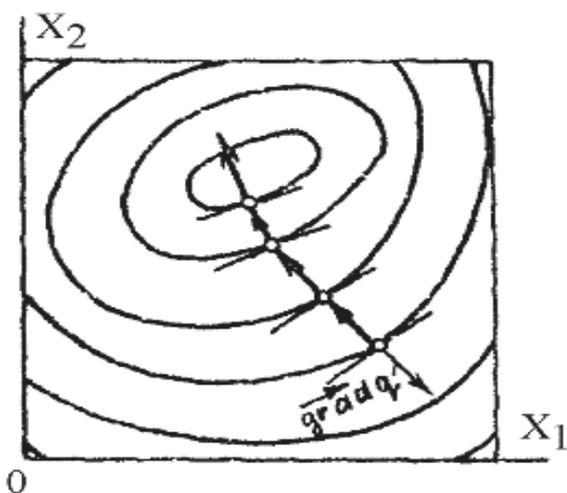


Рисунок 3.14 — Градиентный метод

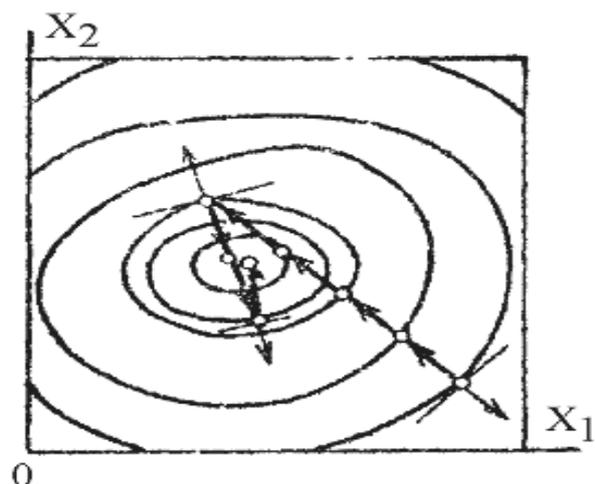


Рисунок 3.15 — Метод наискорейшего спуска

После перехода к измененным значениям параметров вновь определяют составляющие градиента и совершают следующий шаг, и так далее, пока все производные не окажутся меньше некоторой заранее заданной величины.

### *Метод наискорейшего спуска*

Метод наискорейшего спуска (рисунок 3.15) является модификацией градиентного метода и состоит в том, что при поиске минимума функции движение по антиградиенту, определенному в исходной точке, совершается до тех пор, пока функция в данном направлении убывает, после чего градиент вычисляют вновь до достижения заданной малой величины всех составляющих градиента. Итерационная формула процесса

$$X_{ij}^{(t+1)} = X_{ij}^{(t)} - \theta_i^{(t)} \left( \frac{\partial q}{\partial X_i} \right)_j,$$

где  $i = 1, \dots, m$ ;  $m$  — число параметров;  $j$  — номер точки, в которой определен градиент;  $t$  — номер итерации, осуществляемой на данном направлении.

Градиентный метод и в особенности метод наискорейшего спуска обычно имеют более короткие траектории поиска, нежели локальный поиск на координатной сетке, однако требуют вычисления частных производных функции по параметрам. Их эффективность проявляется при большем удалении начальной точки от конечной и при меньшем числе параметров.

## **3.8 Проектирование оптимальных схем стреловых устройств порталных кранов**

### **3.8.1 Параметры и ограничения**

Как отмечалось в разделе 3.2, систему параметров геометрической схемы стрелового устройства следует составить так, чтобы как можно большее

число параметров могло быть определено непосредственно из ограничений уже на стадии проектного задания, т. е. до оптимизации. Тем самым исключаются многие неприемлемые решения, уменьшается размерность задачи оптимизации, становится проще алгоритм оптимизации и сокращается время компьютерных вычислений [19].

Рассмотрим сначала схему сочлененной стрелы. В общем случае, показанном на рисунке 3.16, для ее описания необходимо ввести 13 параметров. К 9-ти параметрам сочлененной стрелы с грузовым канатом, идущим вдоль ее элементов (см. рисунок 3.3), добавляются еще 3 параметра, определяющие положение блоков на колонне и хоботе, а также кратность грузового полиспаста.

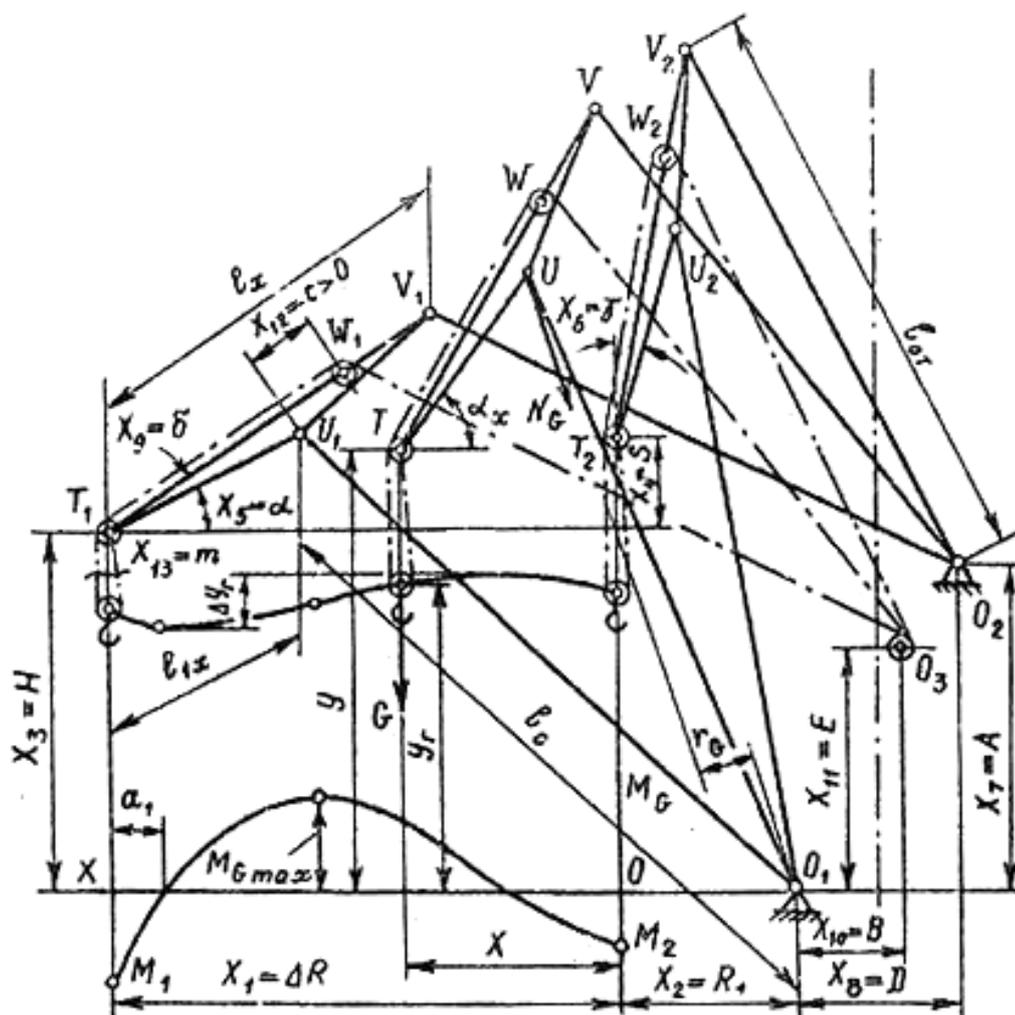


Рисунок 3.16

В систему параметров целесообразно включить следующие величины (рисунок 3.16):

- $X_1$  — диапазон изменения вылета;
- $X_2$  — наименьший вылет от оси качания стрелы;
- $X_3$  — высота конца хобота над корнем стрелы на наибольшем вылете;

$X_4$  — перемещение конца хобота по вертикали при изменении вылета от наибольшего до наименьшего;

$X_5$  — угол хобота с горизонталью на наибольшем вылете;

$X_6$  — угол хобота с вертикалью на наименьшем вылете;

$X_7, X_8$  — координаты нижнего шарнира оттяжки относительно корня стрелы;

$X_9$  — угол хобота;

$X_{10}, X_{11}$  — координаты блока на колонне относительно корня стрелы;

$X_{12}$  — координата блока на хоботе;

$X_{13}$  — кратность грузового полиспафта.

Эта система параметров с позиций оптимизации выгодна тем, что большинство параметров может быть определено с самого начала из ограничений по равенству на основании задания на проектирование или на основании тех весьма узких диапазонов значений, приемлемых по условиям компоновки, которые дают выполненные исследования и практика проектирования.

Принимают следующие значения параметров:

$X_1 = \Delta R$  по проектному заданию;

$X_2 = R_1$  по заданию либо из условия размещения груза под стрелой;

$X_3 = H$  по проектному заданию;

$X_6 = \gamma$  ( $\gamma = 4^\circ \dots 10^\circ$ , меньшие значения предпочтительнее, но требуют специальных мер предохранения каната от спадания с концевого блока хобота);

$X_7 = A$  по проектному заданию либо в интервале  $0,5\Delta R \leq A \leq 0,6\Delta R$ ;

$X_8 = D$  по проектному заданию либо в интервале  $0,07\Delta R \leq D \leq 0,15\Delta R$ ;

$X_9 = \delta$ ;  $\delta = 0$ ;

$X_{10} = B$ ;  $|B-D| \leq 0,1\Delta R$ ;

$X_{11} = E$ ;  $|E-A| \leq 0,1\Delta R$ ;

$X_{13} = m$  по заданию.

Таким образом, не определены всего 3 параметра:  $X_4, X_5, X_{12}$ . Все они могут принимать значения в широких диапазонах без нарушения условий компоновки и нормальной эксплуатации крана. Значения этих трех параметров должны быть найдены в процессе оптимизации по массе стрелового устройства с учетом дополнительных критериев качества, рассмотренных в п. 3.8.3.

Заметим, что в принятой системе параметров длины элементов стрелового устройства являются зависимыми величинами, причем (рисунок 3.16)

$$l_{1x}, l_c = l_{1x}, l_c (X_1, \dots, X_6);$$

$$l_x, l_{OT} = l_x, l_{OT} (X_1, \dots, X_9).$$

Найдем, например, длины  $l_{1x}$  переднего плеча хобота и  $l_c$  стрелы. На наибольшем вылете

$$[O_1T_1] = \sqrt{X_3^2 + (X_1 + X_2)^2};$$

$$\angle U_1T_1O_1 = X_5 + \arctg[X_3 / (X_1 + X_2)];$$

$$l_c^2 = l_{1x}^2 + [O_1T_1]^2 - 2l_{1x}[O_1T_1]\cos(\angle U_1T_1O_1).$$

На наименьшем вылете

$$[O_1T_2] = \sqrt{X_2^2 + (X_3 + X_4)^2};$$

$$\angle U_2T_2O_1 = \pi - X_6 - \arctg[X_2 / (X_3 + X_4)];$$

$$l_c^2 = l_{1x}^2 + [O_1T_2]^2 - 2l_{1x}[O_1T_2]\cos(\angle U_2T_2O_1);$$

после чего из полученных уравнений легко найти  $l_{1x}$  и  $l_c$  по известным значениям  $X_1, \dots, X_6$ . Аналогично можно получить  $l_x$  и  $l_{OT}$  в зависимости от  $X_1, \dots, X_3$ .

Схема прямой стрелы с уравнительным полиспадом в ее наиболее общем случае (рисунок 3.17, а) описывается набором 9-ти параметров:

$X_1$  — диапазон изменения вылета;

$X_2$  — наименьший вылет от оси качания стрелы;

$X_3$  — высота конца стрелы над ее корнем на наибольшем вылете;

$X_4, X_5$  — координаты блоков на колонне;

$X_6, X_7$  — координаты блоков уравнительного полиспада на стреле;

$X_8, X_9$  — кратности грузового и уравнительного полиспадов.

Должны выполняться следующие ограничения:

$X_1 = \Delta R$  по проектному заданию;

$X_2 = R_1$  по заданию либо из условия размещения груза под стрелой;

$X_3 = H$  по проектному заданию;

$X_6 = c, X_7 = d$  по условиям компоновки стрелы (предпочтительны меньшие значения для уменьшения дополнительного нагружения стрелы изгибающим моментом);

$X_8 = m_1$  по проектному заданию;

$X_9 = m_2 = 3m_1$  (меньшие значения не дают должного выравнивания траектории груза при изменении вылета, а эффект дальнейшего увеличения  $X_9$  мал и не окупает усложнения стрелового устройства).

Значения параметров  $X_4$  и  $X_5$  следует определить из оптимизации схемы стрелы по массе и с учетом дополнительных критериев качества (см. п. 3.8.3). Соответствие этих значений ограничениям по компоновке должно быть проверено после оптимизации.

### 3.8.2 Целевая функция

За целевую функцию принимаем расчетную массу основных металлических конструкций элементов стрелового устройства. Оптимизация по массе для данной задачи практически равнозначна оптимизации по экономическим критериям качества (см. раздел 3.3).

Получим выражения для расчетных масс металлических конструкций хобота и стрелы как оптимальных коробчатых балок. Согласно п. 3.7.1, их можно вычислить по формуле:

$$m = \rho\mu \sum \int \Gamma_{\min} dl,$$



где  $\rho$  — плотность материала конструкции;  $\mu$  — конструктивный коэффициент, учитывающий отступления от теоретической оптимальной формы и нерасчетные элементы (диафрагмы, ребра жесткости и пр.). Интеграл берется на одном участке расчетной эпюры изгибающих моментов по наихудшей комбинации нагрузок в плоскости качания стрелы, а сумма — по всем участкам этой эпюры.

Схема нагружения хобота показана на рисунке 3.18. Влиянием продольных сил пренебрегаем. Расчетной комбинацией нагрузок будет  $II_a$  (см. п. 3.5), расчетным положением стрелового устройства — наибольший вылет. Значения коэффициента динамичности  $\psi_{II}$  приведены в справочной литературе [20].

Наибольшая изгибающая нагрузка  $P$  на хобот

$$P = \psi_{II} G \cos(\alpha + \delta).$$

Изгибающий момент на консоли хобота изменяется по уравнению  $M_u = P_x$ . Из п. 3.7.1 имеем

$$F_{\min} = 3,27 \sqrt{M_u \delta_c [\sigma]}.$$

Тогда расчетная масса консоли (в предположении о постоянном по длине хобота значении толщины стенки  $\delta_c$ )

$$m_{1x} = \rho \mu_x \cdot 3,27 \sqrt{\delta_c [\sigma]} \int_0^{l_{1x}} \sqrt{P_x} dx = 3,27 \rho \mu_x \sqrt{P \delta_c [\sigma]} \frac{2}{3} x^{3/2} \Big|_0^{l_{1x}} = 2,18 \rho \mu_x \sqrt{P \delta_c [\sigma]} l_{1x}^{3/2}.$$

Изгибающий момент на участке хобота между его шарнирами

$$M_u = P l_{1x} x / l_{2x}.$$

Масса этого участка

$$m_{2x} = 3,27 \rho \mu_x \sqrt{\delta_c [\sigma]} \int_0^{l_{2x}} \sqrt{P l_{1x} x / l_{2x}} dx = 2,18 \rho \mu_x \sqrt{P \delta_c l_{1x} [\sigma]} l_{2x}.$$

Общая масса хобота

$$\begin{aligned} m_x &= m_{1x} + m_{2x} = 2,18 \rho \mu_x \sqrt{P \delta_c [\sigma]} (l_{1x} \sqrt{l_{2x}} + l_{2x} \sqrt{l_{1x}}) = \\ &= 2,18 \rho \mu_x l_x \sqrt{P l_{1x} \delta_c [\sigma]}, \end{aligned}$$

где конструктивный коэффициент  $\mu_x$  можно принять равным  $\mu_x = 1,3 \dots 1,4$ .

Перейдем к определению массы стрелы шарнирно-сочлененного стрелового устройства. Здесь возможны 2 пути:

- 1) интегрирование формулы  $F_{\min}$  с учетом продольной силы;
- 2) интегрирование формулы  $F_{\min}$ , полученной без учета продольной силы, и учет влияния последней с помощью коэффициента  $\mu_c$  в окончательной формуле массы стрелы.

Рассмотрим более простой 2-й способ. Расчетная нагрузка  $P_c$ , изгибающая стрелу (рисунок 3.19), определяется по комбинации  $II_e$  (см. п. 3.5) на максимальном вылете  $M_{G\max}$  (рисунок 3.18) грузового неуравновешенного момента или по  $II_{e2}$  на минимальном вылете. Значения углов отклонения канатов от вертикали приведены в справочной литературе [20].



$$P_c = \max \begin{cases} P_1 = |P_G - P_\alpha|; X \sim M_{G\min} \text{ (сочетание } II_{e2}) \\ P_2 = P_G + P_\alpha; X = 0 \text{ (сочетание } II_{e1}) \end{cases},$$

где  $X \sim M_{G\min}$  — вылет, соответствующий минимуму грузового неуравновешенного момента (рисунок 3.17, а).

Масса прямой стрелы с несовмещенными блоками грузового и уравнительного полиспастов (рисунок 3.17, а) определяется подобным же образом, но эпюры изгибающих моментов имеют более сложную форму, что необходимо учесть при интегрировании.

### 3.8.3 Дополнительные критерии качества

#### *Синтез схемы стрелового устройства по граничным значениям грузового неуравновешенного момента*

Как уже отмечалось, качество стрелового устройства грейферных и монтажных кранов характеризуется разнообразными показателями, в том числе (см. раздел 3.4):

- кинематическими (отклонение  $\Delta Y_G$  траектории груза от горизонтали при изменении вылета, соотношение  $\omega$  скоростей горизонтального перемещения груза на граничных вылетах);
- силовыми (грузовой неуравновешенный момент  $M_G$ );
- жесткостными (перемещения  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$  точки подвеса груза под нагрузкой, время  $t_3$  затухания колебаний стрелы);
- энергетическими (затраты  $K_3$  энергии при работе механизма изменения вылета);
- конструктивными (длина  $l_k$  каната в зоне стрелового устройства, число  $n_k$  канатных блоков).

Из этих показателей на стадии проектирования схемы стрелового устройства, тип которого известен, следует учитывать характеристики траектории груза  $\Delta Y_G$  и грузового неуравновешенного момента  $M_G$ . Остальные перечисленные критерии качества либо мало, либо вовсе не изменяются по вариантам при оптимизации схемы стрелового устройства ( $\omega$ ,  $l_k$ ,  $n_k$ ), либо в большей степени определяются тем, как спроектирована металлическая конструкция стрелового устройства, а не его схема ( $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $t_3$ ). Все эти показатели нужно учитывать при многокритериальном анализе на стадии структурно-схемной оптимизации (выбора типа стрелового устройства).

От параметров схемы стрелового устройства существенно зависят характеристики траектории груза и грузового неуравновешенного момента, которые должны быть учтены на стадии выбора параметров схемы. Эти характеристики не являются независимыми и связаны соотношением

$$dY_G/dX = k M_G, \quad (3.20)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, переменный по вылету.

Грузовой неуравновешенный момент — это более важный, значимый показатель, чем отклонение траектории груза от горизонтали. Нагрузки от грузового неуравновешенного момента действуют на стрелу в каждом цикле нагружения крана, а все прочие нагрузки (от ветра, сил инерции, раскачивания груза) — только в некоторых циклах. С уменьшением грузового неуравновешенного момента уменьшается изгибающий момент, нагружающий стрелу. Кроме того, как следует из дифференциальной зависимости (3.20) и подтверждается опытом, если значения грузового неуравновешенного момента во всем диапазоне вылетов невелики, то можно быть уверенным, что отклонение  $\Delta Y_T$  траектории груза от горизонтали тоже невелико. Обратное утверждение не всегда справедливо.

Грузовой неуравновешенный момент  $M_G$  является функцией всех параметров стрелового устройства и независимой переменной, связанной с вылетом. Для сочлененных стрел (рисунок 3.16)

$$M_G = M_G(X_1, \dots, X_{13}, \alpha_x),$$

где  $\alpha \leq \alpha_x \leq \pi/2 - \gamma$  — текущий угол наклона хобота.

Для прямых стрел (рисунок 3.17, а)

$$M_G = M_G(X_1, \dots, X_9, X).$$

Грузовой неуравновешенный момент  $M_G$  вычисляется по следующим формулам

$$M_G = N_G r_G \text{ (сочлененные стрелы, рисунок 3.16);}$$

$$M_G = R_I r_I - R_{II} r_{II} \text{ (прямые стрелы, рисунок 3.17, а).}$$

Все входящие в эти выражения величины зависят от веса груза, параметров схемы стрелы и вылета. Характерный вид кривых грузового неуравновешенного момента в зависимости от вылета для сочлененных и прямых стрел показан на рисунках 3.16 и 3.17, а.

Для исключения из множества сопоставляемых при оптимизации вариантов, заведомо не приемлемых по грузовому неуравновешенному моменту, потребуем, чтобы на граничных вылетах грузовой неуравновешенный момент имел некоторые заранее заданные значения, т. е. введем следующие ограничения соответственно для наибольшего и наименьшего вылетов

$$M_G = M_1, M_G = M_2, \tag{3.21}$$

оставив пока без рассмотрения вопрос о том, какие числовые значения принять за допустимые моменты  $M_1$  и  $M_2$ .

Из системы ограничений (3.21) определяют два параметра стрелового устройства. Явное решение возможно лишь для частного случая прямой стрелы с совмещенными блоками грузового и уравнительного полиспастов (рисунок 3.17, б). В общих случаях (рисунки 3.16 и 3.17, а) ограничения (3.21) разрешаются относительно двух параметров стрелового устройства численными методами.

Решение системы ограничений (3.21) само по себе не является оптимизационной задачей, поскольку число искомых параметров равно числу ограничений. Однако оно представляет существенный самостоятельный интерес. Поэтому рассмотрим его подробно. Заметим, что решение указанной системы ограничений иначе называют синтезом схемы стрелового устройства по граничным значениям грузового неуравновешенного момента.

Для *сочлененных стрел* в процессе синтеза определяются параметры  $X_5$  и  $X_{12}$ . Возможность решения системы ограничений (3.21) относительно  $X_5$  и  $X_{12}$  следует из характера влияния изменения этих параметров в отдельности при зафиксированных остальных на кривую  $M_G$  (рисунок 3.20), где стрелками показано направление увеличения параметров.

Изменение  $X_5$  сказывается главным образом в зоне наибольшего вылета. С уменьшением этого угла сочлененная стрела на наибольшем вылете все больше приближается к мертвому положению (расположение оттяжки и заднего плеча хобота на одной прямой), когда траектория груза имеет вертикальную касательную и грузовой неуравновешенный момент становится бесконечным.

Изменение  $X_{12}$ , т. е. смещение блока на хоботе вдоль его оси, приводит только к изменению длины перекатывания канатов при изменении вылета и вызывает, в основном, поворот траектории груза в вертикальной плоскости, а грузовой неуравновешенный момент при этом на всех вылетах изменяется примерно на одну и ту же величину.

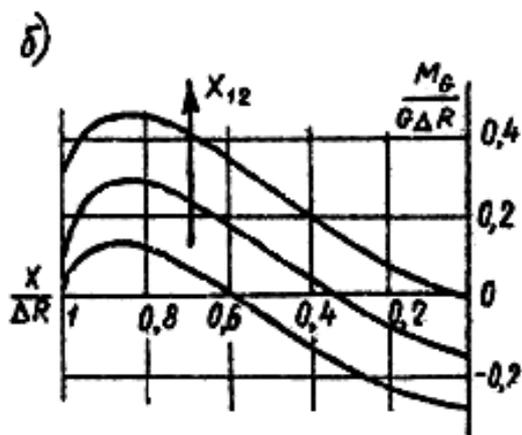
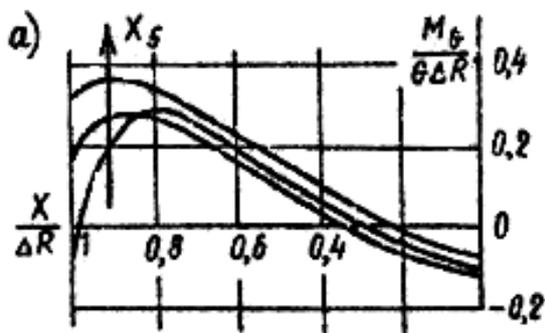


Рисунок 3.20

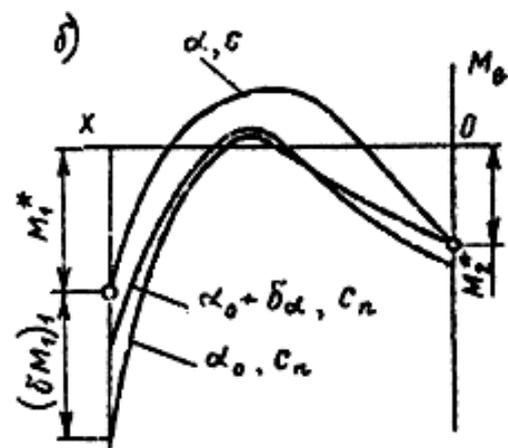
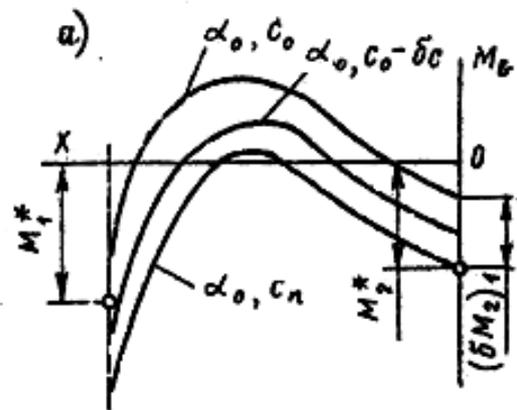


Рисунок 3.21

Алгоритм синтеза пояснен на рисунке 3.21. Исходными являются  $X_4 = s$  и выбранные начальные значения  $X_5 = \alpha_0$  и  $X_{12} = c_0$ . На 1-й стадии процесса (рисунок 3.21, а) определяют значение  $X_{12}$ , отвечающее заданному  $M_2 = M_2^*$ . При исходных значениях  $\alpha_0$  и  $c_0$  вычисляют

$$M_2 = M_2^* + (\delta M_2)_1.$$

Если разность  $(\delta M_2)_1$  положительна, то, в соответствии с рисунком 3.20, б, для приближения к  $M_2^*$  следует уменьшать  $X_{12}$  по сравнению с  $c_0$ . Если же  $(\delta M_2)_1 < 0$ , то  $X_{12}$  в дальнейшем следует увеличивать. Вычислительный процесс предусматривает циклическое изменение значения  $X_{12}$  в требуемом направлении. В конце этой стадии получаем  $X_{12} = c_n$  и соответствующую кривую момента  $M_G$ , имеющую  $M_2 = M_2^*$  и  $M_1 \neq M_1^*$ .

На 2-й стадии процесса (рисунок 3.21, б) определяют значения  $X_5$  и  $X_{12}$ , обеспечивающие  $M_1 = M_1^*$  и  $M_2 = M_2^*$ . При  $X_5 = d_0$ ,  $X_{12} = c_n$  вычисляют

$$M_1 = M_1^* + (\delta M_1)_1.$$

Если же  $(\delta M_1)_1 > 0$ , то для приближения к заданному  $M_1$ , согласно рисунку 3.20, а, нужно уменьшать  $X_5$ . При отрицательной разности  $(\delta M_1)_1$  следует вести процесс увеличения  $X_5$  по сравнению с  $\alpha_0$ . При этом с каждым изменением  $X_5$  происходит изменение  $M_2$ , так что оно становится отличным от  $M_2^*$ . Поэтому при переходе к новому значению  $X_5$  следует откорректировать  $X_{12}$  на величину  $\delta_c$ , так чтобы значение этого параметра отвечало  $M_2 = M_2^*$ . Это осуществляется путем обращения к процедуре 1-й стадии процесса.

В итоге 2-й стадии процесса получаем значения  $X_5 = \alpha$  и  $X_{12} = c$ , которые при принятом  $X_4 = s$  обеспечивают  $M_1 = M_1^*$  и  $M_2 = M_2^*$  с заданной точностью.

Для *прямых стрел с уравнивающим полиспастом* при синтезе схемы по ограничениям (3.21) определяют координаты блоков на колонне  $X_4$  и  $X_5$  (см. рисунок 3.17, а). Их влияние на грузовой неуравновешенный момент показано на рисунке 3.22 (стрелки указывают направление увеличения параметров).

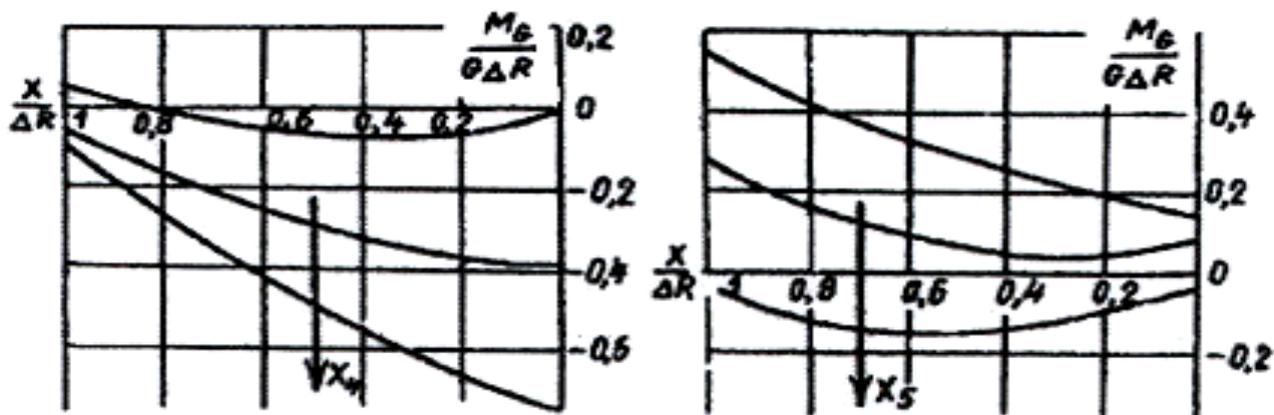


Рисунок 3.22

При построении алгоритма синтеза использован известный численный метод Ньютона (метод касательных) [14]. При принятых начальных значениях  $X_4 = B_0$  и  $X_5 = E_0$  вычисляют значения грузового неуравновешенного момента  $M_1$  и  $M_2$  и определяют погрешности

$$\Delta M_1 = M_1^* - M_1; \Delta M_2 = M_2^* - M_2. \quad (3.22)$$

Эти же погрешности по методу Ньютона определяются как

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_1 &= (dM_1/dX_4)\Delta B + (dM_1/dX_5)\Delta E; \\ \Delta M_2 &= (dM_2/dX_4)\Delta B + (dM_2/dX_5)\Delta E. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Подставив в систему (3.23) значения  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$  из выражений (3.22), получим систему двух уравнений с двумя неизвестными. Далее начальные значения параметров  $B_0$  и  $E_0$  изменяются на  $\Delta B$  и  $\Delta E$ , являющиеся корнями этой системы. Процесс продолжается циклически до достижения значений  $M_1^*$  и  $M_2^*$  с заданной точностью. Частные производные в уравнениях (3.23) определяют численно на малом приращении соответствующих параметров, например

$$\frac{dM_1}{dX_4} = \frac{M_1(X_4 = B_0 + \delta B) - M_1(X_4 = B_0)}{\delta B}; \delta B = 0,01\Delta R.$$

Рассмотрим теперь вопрос о допустимых граничных значениях грузового неуравновешенного момента в ограничениях (3.21). Для сочлененных стрел (рисунок 3.16) с уменьшением алгебраического значения момента  $M_1$  на наибольшем вылете возрастает расстояние  $a_1$ , отделяющее точку устойчивого равновесия стрелы под действием грузового неуравновешенного момента от наибольшего вылета, что хорошо. Однако слишком малые отрицательные значения  $M_1$  (большие по абсолютному значению) нежелательны с позиций нагруженности механизма изменения вылета. Основываясь на статистических данных изготовленных кранов, можно принять  $M_1 = -0,25G\Delta R$ .

Для прямых стрел с уравнивающим полиспастом (рисунок 3.17, а) следует принять  $M_1 = 0$ . При  $M_1 < 0$  возрастают расчетные изгибающие нагрузки на стрелу на всех вылетах, а значения  $M_1 > 0$  неудовлетворительны по условиям уравновешивания стрелы с грузом.

Значение  $M_2$  для обоих типов стрел следует определять в процессе оптимизации. Задачу оптимизации по массе стреловых устройств можно сформулировать следующим образом:

а) для сочлененных стрел найти

$$(X_4 = s, M_2) \sim \min G_{CV} \text{ при } (X_6 = \alpha, X_{12} = c) \sim (M_1 = -0,25G\Delta R, M_2);$$

б) для прямых стрел найти

$$M_2 \sim \min G_C \text{ при } (X_4 = B, X_5 = E) \sim (M_1 = 0, M_2).$$

## ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

### *Часть 1*

- 1 Дайте характеристику термина «проектирование» как процесса.
- 2 Назовите основные виды обеспечения и функции САПР.
- 3 Укажите типовой состав и поясните назначение технических средств АРМ проектировщика.
- 4 Приведите пример иерархии технических объектов проектирования, их внутренних и внешних параметров и связей.
- 5 Перечислите основные этапы проектирования и их содержание.

### *Часть 2*

- 1 Охарактеризуйте типы проектных процедур, их цели и задачи.
- 2 Какие подходы к решению задач структурного синтеза наиболее часто применяются на практике?
- 3 В чем сущность и каковы главные преимущества метода анализа иерархий?
- 4 Рассчитайте глобальный приоритет параметра «Время безотказной работы» по экспертным данным таблиц 2.2 и 2.3.
- 5 Какие средства описания обобщенных структур используются при автоматизированном проектировании? Приведите примеры.
- 6 Какова постановка задачи оптимального проектирования на этапе параметрического синтеза?
- 7 При решении каких задач в САПР используются геометрические модели?
- 8 Назовите виды кривых, используемых при построении геометрических моделей.
- 9 Каковы достоинства и недостатки каркасного моделирования?
- 10 Перечислите виды поверхностей, используемых в поверхностном моделировании. Дайте краткую характеристику каждого вида.
- 11 В чем особенности поверхностного моделирования?
- 12 Опишите характеристики твердотельных моделей.
- 13 Сравните методы конструктивной геометрии и граничного представления, используемые при моделировании твердых тел.
- 14 Какие инструменты создания твердотельных моделей используются в конструкторских САПР?
- 15 В чем заключаются преимущества использования параметрических моделей?
- 16 Какие виды параметрического моделирования используются в САПР?
- 17 Приведите примеры связей и ограничений, накладываемых на модели при использовании вариационной параметризации.
- 18 Какие параметрические связи характерны для иерархической параметризации?

- 19 В чем заключаются сложности, возникающие при моделировании с применением технологии с историей построения?  
20 Каковы особенности технологии прямого моделирования?

### *Часть 3*

- 1 Охарактеризуйте процесс оптимизации конструкций как основу научных исследований при автоматизированном проектировании.  
2 Опишите постановку задачи оптимального проектирования.  
3 Укажите основные этапы оптимального проектирования.  
4 Приведите примеры задач оптимального проектирования технологических машин как многопараметрические и многокритериальные.  
5 Что такое параметры объекта оптимизации? Укажите требования к системе параметров на примере стреловых и уравнивающих устройств.  
6 Охарактеризуйте параметрическую и структурно-схемную оптимизацию.  
7 Опишите критерии качества как количественную оценку качественных свойств объекта оптимизации.  
8 Что такое дифференциальные и комплексные критерии качества?  
9 Охарактеризуйте первостепенность экономических и стоимостных критериев качества на примере металлоемкости конструкций как один из важнейших критериев качества машин.  
10 Дайте определения целевой функции, непрерывных и дискретных критериев качества.  
11 Рассмотрите задачу о выборе оптимальной (по массе и стоимости) марки материала для металлических конструкций балочных стрел.  
12 Что такое ограничения в задачах оптимального проектирования? Опишите ограничения на параметры и на критерии качества. Рассмотрите определяющую роль практики в обосновании ограничений при оптимизации конструкций.  
13 Сформулируйте понятие математической модели объекта оптимизации и дайте ее смысловое наполнение.  
14 Опишите аналитические и нелинейные методы оптимизации, их преимущества и недостатки.  
15 Опишите метод прямого исследования целевой функции на экстремум.  
16 Рассмотрите задачу оптимизации параметров коробчатого сечения балки, работающей на изгиб.  
17 Опишите такие примеры нелинейных методов оптимизации как перебор по координатной сетке, локальный поиск, градиентный метод, метод «наискорейшего спуска».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Андрейчиков А. В. Автоматизированное морфологическое конструирование технических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1991. — № 5. — С. 85–92.
- 2 Бортяков Д. Е., Орлов А. Н. Специальные грузоподъемные машины. Портальные, судовые и плавучие краны: учеб. пособие для вузов по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование»; под ред. К. Д. Никитина. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 159 с.
- 3 Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование: учебник для учреждений высш. проф. образования. — М.: Издательский центр «Академия», 2011. — 272 с.
- 4 ГОСТ 2.701–2008. Единая система конструкторской документации. Схемы. Виды и типы: общие требования к выполнению. Взамен ГОСТ 2.701–84. — М.: Стандартинформ, 2009. — 13 с.
- 5 ГОСТ 23501.101–87. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения. — М.: Издательство стандартов, 1988. — 17 с.
- 6 ГОСТ 23501.108–85. Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначение. — М.: Издательство стандартов, 1985. — 22 с.
- 7 ГОСТ 34.003–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения. — М.: Госстандарт России, 1992. — 16 с.
- 8 ГОСТ 7.32–2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. — М.: Госстандарт России, 2002. — 19 с.
- 9 Малюх В. Н. Введение в современные САПР: курс лекций. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 192 с.
- 10 Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 430 с.
- 11 Плотников Д. Г., Соколов С. А., Боровков А. И., Михайлов А. А. Методика оценки прочности металлических конструкций подъемно-транспортных машин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2015. — № 1 (214). — С. 186–193.  
URL: [http://ntv.spbstu.ru/ntv/article/N1.214.2015\\_21/](http://ntv.spbstu.ru/ntv/article/N1.214.2015_21/)
- 12 Половинкин А. И. Основы инженерного творчества. — М.: Машиностроение, 1988. — 368 с.
- 13 Разработка САПР: в 10 кн. Кн. 2: Системотехнические задачи / А. Н. Данчул, Л. Я. Полуян; под ред. А. В. Петрова. — М.: Высшая школа, 1990. — 144 с.

- 14 Расчет и конструирование строительных и дорожных машин. Оптимизация металлоконструкций на примере стрелы экскаватора: лаб. практикум / В. В. Букреев. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. — 26 с.
- 15 Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. — М.: Мир, 2001. — 604 с.
- 16 Розанов Л. Н. Компьютерные машиностроительные технологии: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 142 с.
- 17 Розанов Л. Н., Солодилова Н. А. Автоматизация проектирования структурных вакуумных схем методом усечения // Вакуумная техника и технология. — 2001. — Т. 11. — № 4. — С. 183–188.
- 18 Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 316 с.
- 19 Серлин Л. Г., Орлов А. Н. Оптимизация крановых конструкций и их автоматизированное проектирование: учеб. пособие. — Л.: ЛПИ, 1987. — 85 с.
- 20 Справочник по кранам: в 2 т. / Под ред. М. М. Гохберга. Л.: Машиностроение, 1988. — 536 с., 559 с.
- 21 Ушаков Д. Кому и зачем нужно прямое моделирование? Обзор конкурентных технологий. — isicad, 2011.  
URL: [http://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=14775](http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=14775)
- 22 Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования по направлениям подготовки бакалавров и магистров / Дирекция основных образовательных программ СПбПУ. — СПб.: СПбПУ, 2015.  
URL: [http://dmo.spbstu.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=153&Itemid=38](http://dmo.spbstu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=153&Itemid=38)
- 23 Черепашков А. А., Носов Н. В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении: учебник для студ. высш. учеб. заведений. — Волгоград: Издательский дом «Ин-Фолио», 2009. — 640 с.

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

АКД — автоматизация конструкторской документации  
АРМ — автоматизированное рабочее место  
АСНИ — автоматизированная система научных исследований  
АСТПП — автоматизированная система технологической подготовки производства  
АСУП — автоматизированная система управления производством  
БД — база данных  
ВММ — вариационное прямое моделирование  
Г — груз  
ГЗ — грузозахват  
ГИ — графическое изображение  
ГО — графический объект  
ГОСТ — государственный стандарт  
Д — двигатель  
ЕСКД — единая система конструкторской документации  
ИО — информационное обеспечение  
ИПП — интегрированный пакет программ  
ИПС — информационно-поисковая система  
и/с — индекс согласованности  
КД — конструкторская документация  
МАИ — метод анализа иерархий  
МВР — механизм вращения  
МИВ — механизм изменения вылета  
МК — металлоконструкция  
МО — математическое обеспечение  
МПД — механизм подъема  
МПК — механизм передвижения крана  
МПП — механизм передвижения тележки  
НИР — научно-исследовательская работа  
НСПД — нормативно-справочная проектная документация  
ОКР — опытно-конструкторская работа  
ОС — операционная система  
ОСТ — отраслевой стандарт  
ПГМ — пространственная геометрическая модель  
ПМ — передаточный механизм  
ПМК — программно-методический комплекс  
ПТК — программно-технический комплекс  
ПО — программное обеспечение  
ПОЯ — проблемно-ориентированный язык  
ППП — пакет прикладных программ  
САПР — система автоматизированного проектирования  
СВР — система вращения  
СИВ — система изменения вылета  
СПбПУ — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
СПД — система подъема  
СПК — система передвижения крана  
СПТ — система передвижения тележки  
СТП — стандарт предприятия  
СУБД — система управления базами данных

ТЗ — техническое задание  
ТП — техническое предложение  
ТР — техническое решение  
ТС — технические средства  
ТУ — технические условия  
УПП — универсальное пространство параметров  
ФГОС ВО — федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования  
ФПП — функциональный пакет программ  
ЧПУ — числовое программное управление  
ЭС — экспертная система  
3D — трехмерный  
B-rep — Boundary representation  
C-rep — Constructive representation  
CAD — Computer-Aided Design  
CAE — Computer-Aided Engineering  
CAM — Computer-Aided Manufacturing  
CSG — Constructive Solid Geometry  
MCAD — Mechanical Computer-Aided Design  
NURBS — Non-Uniform Rational B-spline  
SQL — Structured Query Language  
XML — eXtensible Markup Language

# СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
<b>1 Основы проектной деятельности</b>	
1.1 Введение в автоматизированное проектирование .....	4
1.1.1 Понятие проектирования как процесса.....	4
1.1.2 Задачи проектировщика .....	6
1.1.3 Трудности проектирования.....	7
1.1.4 Проектирование: искусство или наука .....	11
1.2 САПР в машиностроении.....	12
1.2.1 Основные понятия и определения.....	12
1.2.2 Принципы создания САПР .....	18
1.2.3 Состав и структура САПР .....	20
1.2.4 Компоненты и виды обеспечения САПР .....	24
1.2.5 Классификация САПР .....	32
1.2.6 Взаимодействие САПР с другими автоматизированными системами.....	35
<b>2 Моделирование и конструирование в САПР</b>	
2.1 Математическое обеспечение принятия проектных решений .....	37
2.1.1 Проектные процедуры .....	37
2.1.2 Структурный синтез .....	38
2.1.3 Параметрический синтез .....	53
2.2 Геометрическое моделирование .....	55
2.2.1 Виды геометрических моделей.....	55
2.2.2 Моделирование кривых.....	56
2.2.3 Каркасное моделирование.....	63
2.2.4 Моделирование поверхностей .....	65
2.2.5 Методы представления твердотельных моделей .....	69
2.3 Параметризация геометрических моделей .....	77
2.3.1 Табличная параметризация .....	78
2.3.2 Вариационная параметризация.....	79
2.3.3 Иерархическая параметризация.....	82
2.3.4 Прямое моделирование и редактирование .....	86
2.4 Автоматизация выполнения конструкторской документации .....	90
2.4.1 Задача конструирования.....	90
2.4.2 Структура и основные принципы построения системы АКД .....	91
2.4.3 Подходы к представлению и хранению графических данных .....	93
<b>3 Оптимизация проектных решений при автоматизированном проектировании</b>	
3.1 Постановка задачи. Основные этапы оптимального проектирования.....	97
3.2 Параметры объектов оптимизации.....	101
3.3 Параметрическая и структурная оптимизация.....	105
3.4 Критерии качества проектных решений.....	108
3.5 Ограничения при поиске оптимального проектного решения .....	113
3.6 Математическая модель объекта оптимизации .....	116

3.7 Методы оптимизации .....	121
3.7.1 Аналитические методы.....	122
3.7.2 Методы нелинейного программирования .....	127
3.8 Проектирование оптимальных схем стреловых устройств порталных кранов .....	131
3.8.1 Параметры и ограничения.....	131
3.8.2 Целевая функция .....	134
3.8.3 Дополнительные критерии качества .....	138
ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ .....	143
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	145
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	147

*Бортяков Данил Евгеньевич  
Мещеряков Сергей Владимирович  
Солодилова Наталья Алексеевна*

ОСНОВЫ  
ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ  
Учебное пособие

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 — учебная литература

---

Подписано в печать 30.06.2017. Формат 60×84/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 9,5. Тираж 152. Заказ 15719б.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,  
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.