

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

*В. Р. КАРГИН*

ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ ОМД

*Учебное пособие*

**Основы системного проектирования и совершенствования процессов обработки металлов давлением: Учебное пособие** / В. Р. Каргин; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. 88 с.

Системный подход рассмотрен как методологическая база проектирования и совершенствования эффективных процессов обработки металлов давлением, даны основные принципы системного подхода. Описаны этапы системного инженерного проектирования: выявление целей и построение путей их достижения, комплексная оценка получаемых решений. Изложены методы моделирования и оптимизации при анализе и проектировании систем.

Пособие рекомендовано кафедрой обработки металлов давлением студентам спец. 11.08, изучающим курс «Теория систем и ее приложения в процессах обработки металлов давлением», а также для курсового или дипломного проектирования.

Табл. 17. Ил. 42. Библиогр.: 24 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королева

Рецензенты: Е. М. Макаров, Н. М. Тимофеева

## ВВЕДЕНИЕ

В решениях XXVII съезда КПСС указано, что на современном этапе хозяйственного развития СССР решающим стратегическим направлением является повышение эффективности общественного производства, под которым в области обработки металлов давлением (ОМД) подразумеваются значительный рост производительности и снижение себестоимости, увеличение эффективности использования металла и улучшение качества изделий. Для успешного решения поставленных задач необходимо проектировать новые и совершенствовать существующие процессы ОМД. Методологической базой разработки эффективных процессов в настоящее время являются принципы и приемы системного подхода.

Системный подход при анализе явлений различного вида (технических, экономических, социальных и т. д.) представляет собой проявление диалектического подхода к познанию. Системный подход — это изучение части целого с позиции целого. Принцип системности заключается в том, что объект (объект проектирования, совершенствования, конструирования и т. п.) рассматривается как сложная система. Сложную систему можно разделить на конечное число подсистем-элементов. Элементы сложной системы функционируют не изолированно друг от друга, а во взаимодействии. Свойства сложной системы в целом определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимоотношения между ними.

Современная техника, по своему существу, является системной. Любое оборудование, используемое в металлургическом производстве при обработке металлов давлением, представляет собой систему, состоящую из ряда подсистем — механических, электрических, гидравлических, питания, охлаждения, связи, управления и т. п. Производственные процессы обработки металлов давлением (участки, автоматизированные технологические линии, робототехнические комплексы) — это системы, вклю-

чающие машины, людей и различные приспособления. Системным является и способ проектирования новых и совершенствования существующих процессов обработки металлов давлением, предполагающий слаженную работу сотен и тысяч исполнителей.

Необходимость использования инженерами приемов и методов системного подхода объясняется и тем, что темпы развития науки и техники растут с каждым днем, сложность технических устройств и технологий и всей совокупности хозяйственных связей возрастают — это увеличивает длительность разработки системы, в результате к моменту ввода она может оказаться устаревшей. Отсюда основное назначение системного подхода к проектированию — сокращение периода проектирования. Системный подход служит тем общим языком, благодаря которому инженеры различных специальностей могут понимать друг друга.

Основные этапы системного подхода при проектировании — выявление целей и «построение» путей их достижения, комплексная оценка полученных решений. К числу таких целей для процессов ОМД необходимо отнести повышение качества изделий, показателей технологического процесса и эффективности производства. Для достижения указанных целей в соответствии с научной методологией системного подхода необходимо в процессе проектирования выделить по возможности все альтернативные ситуации, связанные с выбором наилучшего проектного решения. Выбор наилучшего решения осуществляется с помощью методов математического моделирования и оптимизации.

Цель данного пособия — дать студентам представление о инженерном проектировании как о системном процессе, привести обзор методов проектирования и примеры их применения. Правильное инженерное проектирование возможно только при учете взаимосвязей между системой и схемой, конструкцией и технологией, производством и эксплуатацией.

---

---

## 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПРИЕМЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

### 1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМЫ

Чтобы прийти к определению понятия «система», рассмотрим несколько различных объектов, которые интуитивно представляются нам системами. Физические и механические свойства сплава определяются составом и количеством легирующих элементов, входящих в данный сплав. Функции трубопрофильного гидравлического пресса определяются его схемой. Способность металлургического завода к выпуску изделий зависит от организации его производственного процесса в целом. Объекты по своей природе разнородны, но в них есть общее. Это общее во всех приведенных примерах заключается в том, что объекты являются системами, каждая из которых содержит элементы, а определенное свойство на выходе системы задается отношением элементов внутри. Иными словами, внешняя функция системы (цель) определяется ее внутренним устройством. Отсюда и вытекает определение системы.

*Система* — это совокупность взаимосвязанных элементов, образующих единое целое и определенным образом взаимодействующих для достижения заданной цели.

Под *элементами* системных объектов следует понимать подсистемы, внутрь которых описание не проникает, если они сами в дальнейшем рассматриваются как системы. В качестве элементов могут быть физические, технические, математические, биологические и т. п. подсистемы.

Кроме приведенного определения системы в литературе [5, 6, 8, 13] существуют десятки других определений. Но из любого следует:

система — это прежде всего совокупность элементов; имеется наличие существенных связей между элементами или их свойствами, превосходящих по силе связи элементов с элементами, не входящими в данную систему;

имеется наличие определенной организации элементов; существуют интегративные качества (свойства), присущие системе в целом, но не свойственные ни одному из элементов в отдельности.

Например, ножницы для резки металлов — это простая механическая система, состоящая из трех элементов. Эти элементы связаны между собой в определенном порядке и представляют единое целое — ножницы. Интегративным свойством ножниц является способность резать металл на части за счет двухстороннего воздействия режущих кромок.

Электронно-вычислительная машина, управляющая ходом технологического процесса ОМД, — более сложная техническая система. В зависимости от уровня рассмотрения элементами ЭВМ могут быть отдельные логические схемы, узлы, блоки, датчики или устройства (арифметические, запоминающие, управляющие и т. п.). Указанные элементы связаны различными связями: механическими, электрическими, информационными. Распределение основных связей между элементами зафиксировано во времени и пространстве, что говорит о вполне определенной организации элементов. Интегративные свойства данной системы обусловлены способностью ЭВМ обрабатывать информацию, производить логический анализ, решать задачи по контролю технологических параметров и т. п.

Таким образом, система не сводится к простой совокупности элементов и, расчленив систему на отдельные части, изучая каждую из них в отдельности, нельзя познать все свойства системы в целом. Чем сложнее система, тем больше у нее интегративных свойств.

Примерами бессистемных объектов являются: кучка песка (слабая связь элементов-песчинок и отсутствие устойчивой внутренней связи; колесо в виде цельного однородного диска (отсутствует элементный состав на механическом уровне; металлолом).

Рассмотренный выше подход является дескриптивным (описательным) определением системы. Он применяется в тех случаях, когда необходимо объяснить, как устроен листопрокатный стан, закономерности технологического процесса прессования профилей и т. п. Тогда система выступает только в том отношении, в каком внешнее проявление (свойство, функция) задается внутренним устройством (отношения, структура, взаимодействие и т. п.).

Инженер, проектирующий новый технологический процесс, высокопроизводительное оборудование, идет конструктивным путем, т. е. по заданной функции находит структуру системы. Выделение и построение новой системы осуществляется таким

образом: ставится цель, определяется функция, обеспечивающая достижение этой цели, а затем подыскивается или создается структура, обеспечивающая выполнение функции (рис. 1).

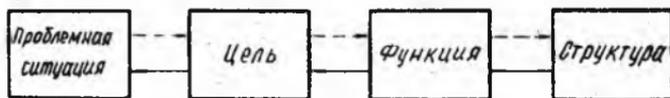


Рис. 1. Схема образования и функционирования системы

Новая цель возникает тогда, когда создается *проблемная ситуация*. Ситуация называется проблемной, если она не может быть решена имеющимися средствами. Необходимость выработки недостающих средств ставит новые цели, для реализации которых создаются новые системы. В этой связи говорят, что нет системы без проблемы. Система — это средство решения проблемы.

Например, при горячей штамповке малопластичных и труднодеформируемых сплавов существующие способы не позволяли получать высококачественные изделия. Возникла проблемная ситуация, откуда появилась цель — разработать новый способ штамповки. Реализация этой цели осуществлена через функцию системы — высокоскоростное деформирование. В результате создана новая система — высокоскоростной молот.

Цель, вытекающая из проблемы, является объективным критерием для отбора того, что должно войти в систему из окружающей среды. Из бесконечного мира в систему включается конечное число элементов, которые необходимы для функционирования системы, обеспечивающей достижение цели. Теперь можно четко представить границы между вновь созданной системой и средой (рис. 2). Среда представляет собой совокупность всех систем, кроме той, которая образуется под данную цель. Из системы исключаются не только пространственные, внешние по отношению к ней элементы, но и те элементы, которые вещественно входят в состав элементов данной системы, но функционально исключены из нее, так как обеспечивают достижение целей других систем.

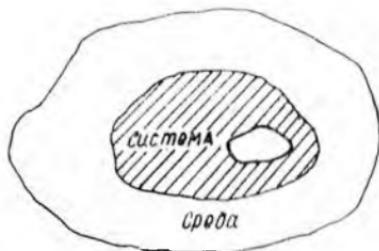


Рис. 2. Схематическое представление системы и среды

Ни одна система не является абсолютно замкнутой. Взаимо-

действие системы со средой представляется внешними информационными и ресурсными связями на входе и выходе. На входе система получает что-то из среды, на выходе среда получает что-то из системы (рис. 3). Для процессов обработки металлов

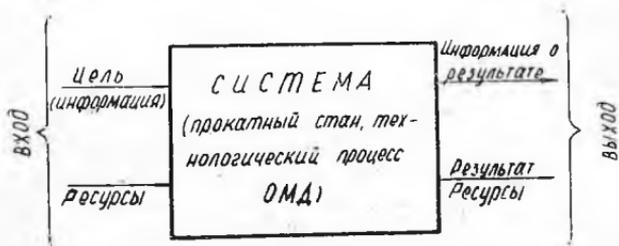


Рис. 3. Входы и выходы системы

давлением внешними информационными связями на входе являются входные переменные, изменяющиеся непрерывно или дискретно. К ним можно отнести управляемые параметры, такие как скорость деформирования, размеры заготовки, степень деформации, размеры деформирующего инструмента, тип оборудования и т. п.

Внешними связями на выходе из системы являются выходные величины, которые содержат сведения о количественных и качественных характеристиках изготавливаемого изделия, таких как точность, механические свойства, текстура и т. д., а также об эффективности процесса и т. п. Значения входных и выходных переменных заключены в определенном интервале, задаваемом технологическим регламентом процесса или техническим обеспечением.

Кроме управляемых параметров на входе имеют место контролируемые, но неуправляемые параметры, целесообразное изменение которых невозможно в данном процессе (например качество исходной заготовки, изменяющееся от партии к партии), и неконтролируемые параметры, возмущаемые воздействия которых носят случайный характер и не поддаются определению. Совокупность контролируемых неуправляемых и неконтролируемых параметров часто называют *помехой*.

Для реализации системы также нужен определенный материал, средства и энергия. Вещество и энергия необходимы для воплощения цели в конечный продукт.

*Информационный вход системы* — это информационная цель, а *ресурсный вход* — это материалы, энергия, необходимые для ее реализации. *Ресурсный выход системы* — это результат ее деятельности, а *информационный выход* — информация о степени этого соответствия.

## 1.2. ТИПЫ СИСТЕМ

Существует большое количество классификаций систем. Их можно разделить по двум основным типам: предметный и категориальный [5, 8]. К предметному типу систем относят основные виды конкретных систем, существующих в природе и обществе (технические, экономические, социальные, биологические и т. п.). Таких названий можно дать бесчисленное множество. Категориальный тип позволяет классифицировать системы по общим характеристикам, присущим любым системам, независимо от их материального выражения: простые и сложные системы; детерминированные и стохастические (вероятностные) системы; статические и динамические системы; моно- и полисистемы.

Количественно все компоненты систем могут быть охарактеризованы как «моно» (одно свойство, одно отношение, один элемент) и «поли» (много свойств, отношений, элементов) компоненты. По составу компоненты систем оцениваются как статические (находящиеся в состоянии относительного покоя) и динамические (изменяющиеся). В свою очередь, компоненты, охарактеризованные как динамические, делятся на функционирующие (изменение не ведет к смене качества) и развивающиеся (изменение приводит к смене качества). Примерами динамической функционирующей системы является работа гидравлического пресса, производящего одну и ту же продукцию, динамической развивающейся системы — работа металлургического завода, осваивающего выпуск новых изделий; студент, приобретающий специальность инженера-металлурга.

Структурно (по характеру отношений с другими явлениями) компоненты систем оцениваются, во-первых, как детерминированные и стохастические и, во-вторых, как простые и сложные. Система является детерминированной, если ее поведение обусловлено конечным множеством элементов, входящих в нее, и отношений между ними. Поведение параметров детерминированной системы полностью объяснимо и предсказуемо в любых заданных условиях. Система является стохастической, если ее поведение обусловлено объектами, не входящими в конечное множество составляющих данной системы, а значения параметров являются неопределенными.

В настоящее время нет однозначного определения сложной системы. Определяя ее, выбирают признак, по которому можно отличить сложную систему от простой. В качестве формальных признаков при определении сложной системы выделяют число взаимосвязанных элементов, отсутствие формальной математической модели, способ описания системы.

Советский ученый Г. Н. Пивоваров в зависимости от числа

Элементов выделяет четыре класса систем: малые ( $10 \dots 10^3$ ), сложные ( $10^4 \dots 10^7$ ), ультрасложные ( $10^7 \dots 10^{30}$ ), суперсистемы ( $10^{10} \dots 10^{200}$ ).

Академик А. И. Берг определяет сложную систему как систему, которую можно описать не менее, чем на двух математических языках, например, теория дифференциальных уравнений и алгебра Буля. С точки зрения технических решений под сложной мы будем понимать систему:

- построенную для решения многоцелевой задачи;
- для описания которой используется несколько математических языков;
- включающую взаимосвязанный комплекс разнородных моделей;
- отражающую разные несравнимые объекты, характеристики объекта.

Например, металлургическое предприятие следует рассматривать как сложную систему, представляющую собой некоторую организованную совокупность рабочих мест, оборудования, агрегатов, способных перерабатывать заготовки в продукцию. При этом весь процесс производства по характеру прохождения продукции через отдельные рабочие места, агрегаты можно расчлениить на отдельные операции — *производственные процессы*. С общей точки зрения в каждом производственном процессе происходит соединение различного рода ресурсов (труда, оборудования, оснастки, заготовок, материалов, энергии, конструкторско-технологической информации и т. п.) для получения тех или иных изделий.

Все указанные выше системы могут переходить из одного типа в другой, поэтому отнесение той или иной системы к определенному виду является в значительной мере условным.

### 1.3. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Структурный анализ проводят тогда, когда необходимо выяснить, как система устроена, из каких частей состоит, как эти части связаны между собой. Структурный анализ осуществляется в два этапа:

- определение элементного состава систем, т. е. полного перечня элементов;
- выяснение структуры системы и характера связей. Обычно выделяют информационные, энергетические и вещественные связи.

Знать структуру системы — это знать закон, по которому порождаются элементы системы и отношения между ними. Структура может быть формальной (логической) и материальной. *Формальная структура системы* — это совокупность функ-

циональных элементов и их отношений, необходимых и достаточных для достижения системой заданных целей. *Материальная структура* системы — это реальное исполнение формальной структуры.

В качестве поясняющего примера рассмотрим систему, целью (функцией) которой является деформирование (любой технологический процесс обработки металлов давлением). Формальная структура технологического процесса обработки металлов давлением есть совокупность отношений между функциональными элементами — оборудованием, инструментом, заготовкой и изделием.

Необходимыми и достаточными отношениями между перечисленными элементами являются однозначная связь оборудования с инструментом, заготовки и изделия с инструментом (рис. 4). Наличие данной формальной структуры присуще любому технологическому процессу обработки металлов давлением: прессованию или волочению, прокатке, горячей или холодной штамповке.

Материальная структура, реализующая формальную структуру технологического процесса обработки металлов давлением, определяется конкретным процессом. Например, при прокатке в качестве оборудования может быть взят стан, в качестве деформирующего инструмента — валки, заготовки — слэб, а изделия — лист.

Из приведенного примера следует, что:

фиксированной цели соответствует одна и только одна формальная структура системы;

одной формальной структуре может соответствовать множество различных материальных структур.

Учитывая характер связей между элементом данной системы



Рис. 4. Формальная структура процессов ОМД

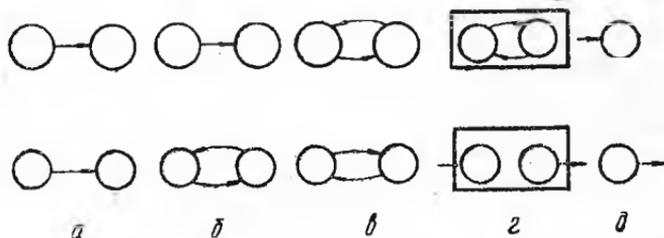


Рис. 5. Виды связей

с другими элементами этой же системы и внешней средой, можно выделить следующие виды связей: направленные и ненаправленные (рис. 5, а); односторонние и двухсторонние (рис. 5, б); равноправные и неравноправные (рис. 5, в); входные и выходные (рис. 5, г); внутренние и внешние (рис. 5, д).

Каждая из этих связей может быть постоянной или переменной, непрерывной или дискретной.

Существование большого разнообразия структур заставляет классифицировать их по видам: а) последовательная (рис. 6, а); б) кольцевая (рис. 6, б); в) древовидная (рис. 6, в); г) радиальная (рис. 6, г); д) полный граф (рис. 6, д).

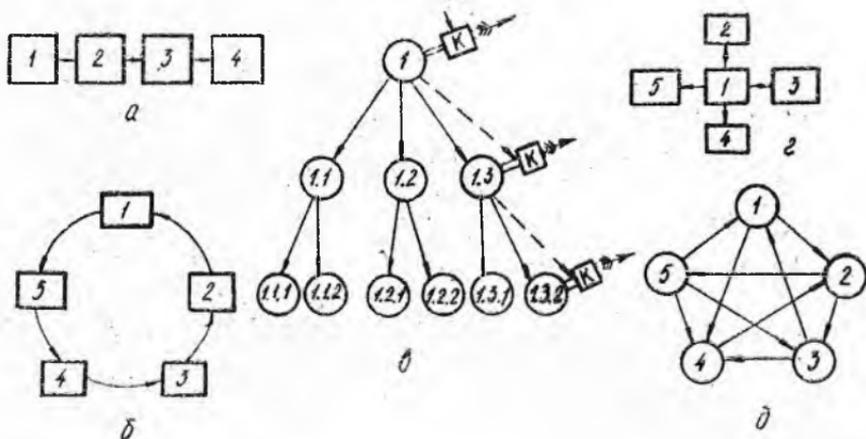


Рис. 6. Основные виды структур: → внутренние связи; ⇒ внешние связи со средой; ———→ контролирующие связи

Новые структуры, как правило, порождаются последовательным использованием основных видов. В практике широкое распространение получили древовидные структуры, которые можно подразделить на два класса: идеальные иерархические структуры и неидеальные иерархические структуры. Учитывая особую важность таких структур, остановимся на них более подробно.

Идеальная иерархическая структура характеризуется следующими признаками:

*многоуровневость* (рис. 7);

*субординация внутренних связей:* элементы данного уровня связаны только с элементами ближайшего верхнего и ближайшего нижнего уровней;

*ветвистость:* элемент данного уровня связан только с одним элементом верхнего уровня и с несколькими элементами нижнего уровня;



Рис. 7. Иерархия многоуровневой системы

*пирамидальность*: на самом верхнем уровне имеется только один элемент;

*субординация внешних связей*: элементы каждого уровня могут быть связаны с внешней средой, однако эти связи контролируются элементами ближайшего верхнего уровня. Внешняя связь верхнего элемента контролируется только вне системы.

Пример трехуровневой идеальной иерархической структуры дан на рис. 6, в: кружками изображены элементы структуры, стрелками — внутренние связи, двойными стрелками — внешние связи со средой, пунктирной стрелкой — контролирующая связь.

В реальных системах встречаются различные отступления от идеальной иерархической структуры. Перечислим типы этих нарушений:

элемент данного уровня связан только с одним элементом нижнего уровня (иерархия с синекурой);

элемент данного уровня связан более чем с одним элементом верхнего уровня (иерархия с расщеплением);

элемент данного уровня связан с элементом высших уровней, минуя ближайший верхний уровень (дислокация в иерархии);

на самом верхнем уровне имеется несколько элементов (незавершенность иерархии);

элемент данного уровня связан непосредственно с элементами разных нижних уровней (неоднородность иерархии);

элементы одного уровня связаны между собой (внутриуровневая зависимость);

связи элементов данного уровня с внешней средой контро-

дируются верхним уровнем или элементами других уровней (нарушение субординации внешних связей).

Идеальных иерархий в природе не существует. Однако есть интуитивные основания полагать, что чем ближе структура к идеальной иерархической, тем эффективнее будет работать система.

#### 1.4. МЕТОД «ДЕРЕВА» ЦЕЛЕЙ

В системном анализе для структуризации вновь создаваемых или совершенствования существующих систем (устройств, агрегатов, процессов и т. п.) используют «дерево» целей, представляющее собой определенным образом иерархически упорядоченную совокупность целей и подцелей. Каждая вершина «дерева» представляет собой цель для всех исходящих из нее ветвей. Любая цель имеет конкретное содержание и осуществляется определенными средствами в соответствии с достигнутыми на всех исходящих ветвях целями. Эти цели, в свою очередь, являются подцелями для вышестоящей цели. Если на одном уровне иерархии достигнуты все цели, то цель будет достигнута и на следующем, более высоком уровне. Таким образом, «дерево» целей выступает в качестве инструмента увязки целей высшего уровня с конкретными средствами их достижения на низшем уровне через ряд промежуточных звеньев и представляет собой каркас, организующий разнородную содержательную информацию. Для построения «дерева» целей инженеру необходимо изучить закономерности поставленной проблемы.

Для каждой конкретной проблемы «дерево» целей строится путем метода декомпозиции, последовательного выделения все более мелких компонентов на понижающихся уровнях. При этом необходимо соблюдать следующие требования:

из каждой вершины «дерева» должно исходить не менее двух ветвей;

число ветвей, исходящих из каждой вершины, не обязательно должно быть одинаковым;

ветви, исходящие из вершины, должны быть взаимно исключяющими, т. е. должны обладать свойством альтернативности;

исходящие из одной вершины ветви должны удовлетворять условиям полноты и непротиворечивости. Непротиворечивость означает, что достижение одной из пары целей предполагает достижение другой и наоборот;

«дерево» целей не должно иметь изолированных вершин, т. е. должны отсутствовать цели, не связанные с другими целями исследуемой проблемы;

описание каждой цели «дерева» должно достаточно точно

раскрывать его содержание и устанавливать степень ее достижения.

Кроме описательного «дерева» целей, показывающего состав элементов исследуемой системы и их иерархическую соподчиненность, строятся также и «деревья» целей, показывающие альтернативные решения поставленной задачи. Начиная с некоторого уровня, такое «дерево» показывает возможные альтернативные решения. Каждая подцель имеет несколько альтернативных решений — инженеру приходится выбирать одну из возможных альтернатив.

При построении «дерева» целей для сложных систем каждая цель кодируется. Код цели указывает на ее связь с целями более высокого уровня. Кодирование вершин должно обеспечить однозначное построение и расчленение «дерева», не нарушая общего принципа кодирования. Система кодирования целей может быть буквенная, цифровая и буквенно-цифровая. Один из вариантов кодирования представлен на рис. 8.

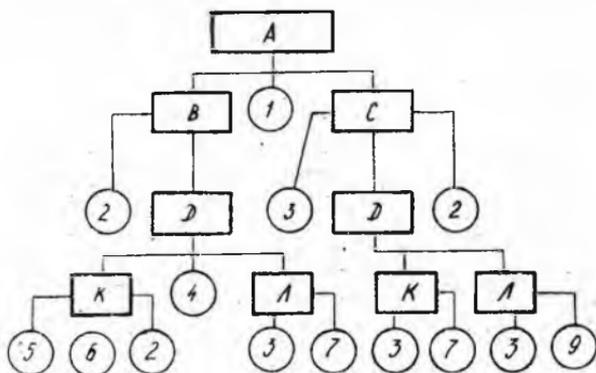


Рис. 8. Иерархическая структура материальных потоков сборки изделия А

«Дерево» целей может являться основой синтеза системы. В качестве примера рассмотрим решение задачи синтеза системы «деформирующий инструмент», целью которой  $A_0$  является деформация металла при холодной прокатке тонкой стальной ленты. Признак декомпозиции сформулируем в виде вопроса: какие условия необходимы для реализации поставленной цели? Итогом декомпозиции на первом шаге является следующий состав (подцелей):  $A_1$  — создание больших давлений, превышающих предел текучести прокатываемого металла;  $A_2$  — сохранение образующих рабочей поверхности валков;  $A_3$  — способность валков воспринимать большой крутящий момент.

Проверяем полученные подцели на элементарность. Выясня-

ется, что для реализации подцели  $A_1$  необходимо иметь рабочие валки малого диаметра. Если такие валки имеются, то данная подцель является элементарной. Подцели  $A_2$  и  $A_3$  также оказываются элементарными. Для реализации подцелей  $A_2$  и  $A_3$  возможно несколько альтернативных решений: иметь либо валки большого диаметра, либо каскад рабочих и опорных валков.

Переходим к этапу синтеза вида инструмента. Поскольку предложено наличие ресурсов, необходимых для реализации всех вышеперечисленных подцелей одновременно, то получаем одну из возможных конструктивных схем инструмента, например предложенного Сендзимиром (рис. 9).

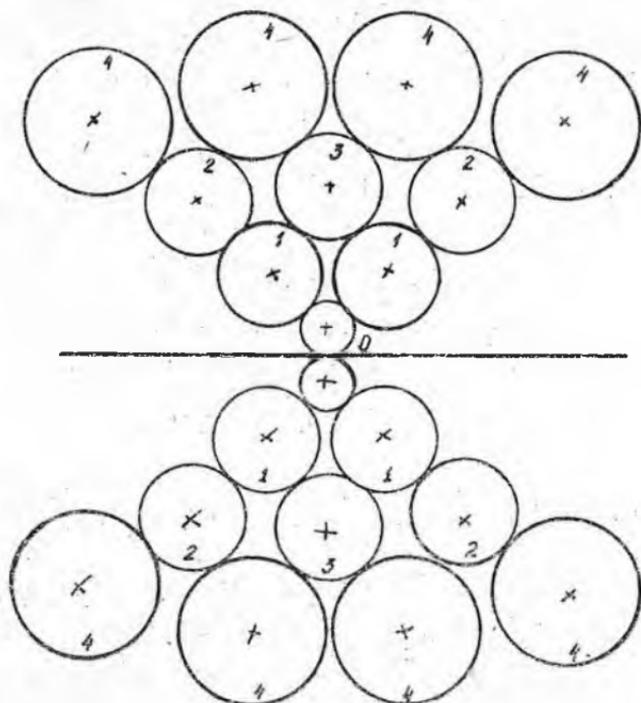


Рис. 9. Конструктивный вид валков прокатного стана Сендзимира: 0 — рабочие валки; 1 — опорные валки; 2 — приводные валки; 3 — опорные валки; 4 — опорные колеса

Рабочие валки имеют диаметр, несколько больший 40 мм, что позволяет создать большое давление, превышающее предел пластичности материала. Таким тонким валкам невозможно передать крутящий момент от привода в несколько сотен киловатт; для этого используется фрикционный комплекс, состав-

ленный из валков 0 и валков 1 и 2. Критерий малых допускаемых отклонений толщины ленты требует большой жесткости комплекса ввиду необходимости сохранения прямолинейности рабочих валков. Это обеспечивается комплексом валков 1, 2, 3, а также подпорных колес 4.

### 1.5. ЭТАПЫ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Инженер (технолог) — это посредник между наукой и обществом, который применяет свои знания для решения проблем человечества. Инженер в процессе работы создает реальный прибор, технологический процесс, робототехнический комплекс и т. п., которые нужны обществу. Процесс работы, называемый *проектированием*, составляет суть инженерного дела.

Основные этапы системного проектирования (рис. 10) позволяют выявить цели, построить пути их достижения и дать комплексную оценку получаемых решений.

По словам К. Маркса «самый плохой архитектор от наилучшей пчелы с самого начала отличается тем, что прежде чем построить ячейку из воска, он уже построил ее в своей голове». Расхождение между желаемым и действительным и будет составлять проблему. В таком понимании — это абстрактная категория из области познания, выражающая понимание людьми мотивов своей деятельности.

Чтобы решать проблему, инженеры создают системы. В самом общем понимании система, как совокупность всех необходимых знаний и сведений, материальных средств и способов их использования, методов организации деятельности людей есть способ решения проблемы. Чтобы правильно спроектировать систему, необходимо уяснить ее цель. *Цель* может определяться заданием или вытекать из характера работы. Если мы имеем крупную проблему, например создание автоматизированного прокатного стана, то и система будет сложной и крупной. Для нее можно определить цель лишь в общих терминах. Между тем работа по созданию системы осуществляется конкретными людьми, отделами, организациями, поэтому необходимо об-

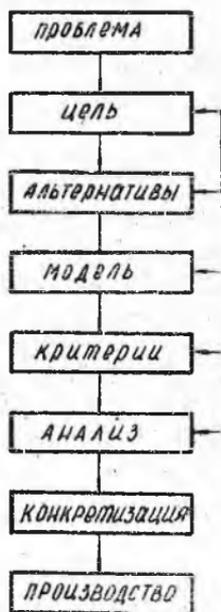


Рис. 10. Последовательность этапов системного проектирования

щую цель разукрупнить (декомпозиция цели) до конкретных исполнителей.

*Альтернативы* — это пути достижения целей. При этом должны рассматриваться всевозможные альтернативы, например, для перемещения груза в цехе могут быть использованы следующие альтернативы: железная дорога, автомобиль, кран, электрокара, транспортер и т. д.

При реализации любой альтернативы могут быть использованы различные средства. Они различаются по затратам, стоимости, доступности, дефицитности и т. п. Необходим единый метод для отбора различных средств. Он обеспечивается критерием. *Критерий* — это правило, на основе которого принимается из множества возможных одно предпочтительное решение. Критерий определяет эффективность любой альтернативы.

Для описания зависимости между альтернативами и критериями строят модели физические, математические, смешанные, имитационные. При анализе модели рассматривается различное множество вариантов решения проблемы. В ряде случаев эти варианты трудносравнимы, так как включают явления различной природы: материальные, социальные, политические, моральные, психологические и т. п.

Таким образом, при системном проектировании инженеру необходимы три основных качества: изобретательность, умение проводить анализ и принимать решения. *Изобретательство* — это генерация ряда альтернатив, *анализ* — детальное изучение каждой из альтернатив, а *принятие решения* — выбор предпочтительного решения из числа имеющихся альтернатив.

После выбора оптимального варианта дается полная конкретизация решения со всеми его характеристиками и система запускается в производство.

## Задачи к разд. 1

1.1. Сформулируйте две или три известные вам инженерные задачи (проблемы). Определите возможные альтернативы, критерии и ограничения для каждой задачи.

1.2. Определите противоречивые требования, которые придется выполнять инженеру-металлургу при проектировании деформирующего инструмента.

1.3. Опишите проект скоростного автоматизированного прокатного стана, выпускающего тонкий алюминиевый лист. Это описание должно включать обстоятельства, под влиянием которых возник этот проект, трудные или необычные задачи, входящие в него, окончательный результат, приносимая польза и т. п.

1.4. Вы — студент металлургического факультета. Каждый

курс, который вам читают, предназначен для того, чтобы развить в вас определенные качества. Проанализируйте каждый из курсов и определите такие свойства.

1.5. Ниже приведены решения некоторых задач обработки металлов давлением. Попробуйте сформулировать эти задачи: а) печь для отжига; б) автоматизированный склад; в) гидравлический пресс; г) кузнечно-штамповочный цех.

1.6. Ниже приведена группа объектов: а) фреза; б) штамп; в) гидравлический пресс. Определите для каждого объекта функцию и функциональный элемент, обеспечивающий реализацию данной функции.

1.7. Провести структурный анализ следующих системных объектов: а) велосипед; б) система автоматического регулирования температуры в печи; в) технологический процесс изготовления поковок; г) система подготовки инженеров в техническом вузе.

1.8. Построить укрупненное иерархическое дерево целей металлургического завода.

1.9. Построить дерево целей для механической системы, бытовые пружинные весы. Определить для каждой подцели множество альтернативных решений. Провести синтез системы.

1.10. Необходимо получить трубку определенного диаметра и с заданной толщиной стенки из алюминиевого сплава. В трубном цехе имеется разнообразное оборудование: гидравлические прессы, станы холодной прокатки труб, волочильные станы, правильные машины и печи для термообработки. Предложите различные альтернативные варианты технологических маршрутов получения такой трубы. Как выбрать оптимальный маршрут?

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

### 2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При проектировании систем для описания зависимости между различными альтернативами и критериями строят модели. Модель имитирует сложную систему, позволяет многократно воспроизвести процесс и оценить все возможные варианты, выбрать из них наиболее предпочтительные.

Относительно проектируемой системы обычно известны (и то неполностью) входные (определяемые средой) и выходные (определяемые назначением системы) параметры. На рис. 11 приведена схема изучения системы с помощью модели. При построении модели на основании эмпирических или предположи-

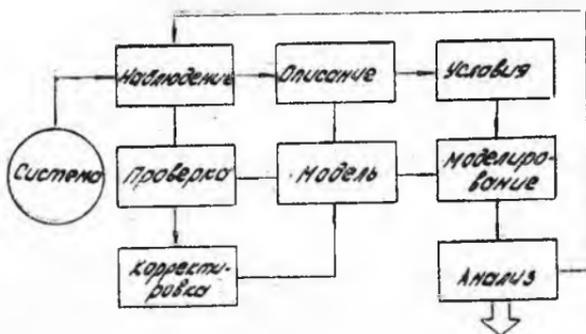


Рис. 11. Схема изучения системы с помощью модели

тельных данных реальные системы эффективно упрощаются. Чем удачнее будет подобрана модель, тем лучше она будет отражать главнейшие черты системы [6, 9].

Модель должна отражать все существенные входные и выходные параметры, от которых в основном зависит успех расчета. Две опасности всегда подстерегают инженера—составителя модели: первая—увязнуть в подробностях «из-за деревьев не увидеть леса» и вторая—слишком огрубить явление «выплеснуть вместе с водой и ребенка». Для построения модели нужно искусство, которое приобретается в процессе опыта. Поскольку модель приближенно описывает объект, всегда полезно не верить слепо ни одной модели, а слышать результаты, полученные по разным моделям. Если результаты от модели к модели меняются мало—это серьезный аргумент в пользу объективности исследования.

При создании модели нужно глубокое знание существа моделируемой системы, поэтому «чистые» математики без помощи инженеров с построением моделей справляются плохо.

Следует различать предметное моделирование и абстрактное моделирование. При *предметном моделировании* исследование системы ведется на *физической модели*, воспроизводящей основные геометрические, физические, динамические и функциональные параметры реальной системы, например, на модели проектируемого высокоскоростного самолета, испытываемого в аэродинамической трубе. Если модель и моделируемый объект имеют одну и ту же физическую природу, то говорят о *физическом предметном моделировании*.

Под *математическим предметным моделированием* понимают способ исследования различных процессов путем изучения яв-

лений, имеющих различное физическое содержание, но описываемых одинаковыми математическими соотношениями. В простейших случаях для этой цели используют известные аналогии между механическими, электрическими и другими явлениями.

Модели могут быть реализованы и с помощью абстрактных объектов. К ним относятся, в частности, формулы, уравнения, неравенства, логические условия и т. п., описывающие параметры объекта моделирования. Таким образом, мы приходим к понятию *математического моделирования*, позволяющего по заданным входным величинам  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  получать выходные величины  $Y = \{y_1, \dots, y_k\}$ .

Математическое моделирование является наиболее совершенным и эффективным методом моделирования, открывая путь для современных мощных методов математического анализа, вычислительной математики при исследовании и оптимизации технологических процессов. Например, трудно представить, чтобы можно было специально в целях моделирования создать опытный образец крупного автоматизированного предприятия в металлургической промышленности. Такой физический эксперимент привел бы к огромным дополнительным материальным затратам и значительному увеличению сроков ввода объекта.

Для построения математических моделей процессов ОМД используют теоретические, статистические и экспериментальные методы исследования систем. Большинство процессов ОМД характеризуется нестационарностью, неравномерностью деформаций и температурных полей, неоднородностью граничных условий, воздействием большого числа факторов, учесть которые в теоретическом отношении сложно. Значительно большие возможности с точки зрения получения достоверных решений дает применение статистических методов, методов линейного и динамического программирования, методов сетевого планирования и теории массового обслуживания.

## 2.2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Для статистического моделирования систем используют теорию корреляции. *Корреляция* — это такая связь, при которой с изменением одной случайной величины получается определенное распределение вероятностей другой величины. Отыскание уравнения этой связи и является первой основной задачей теории корреляции. Второй задачей является определение тесноты корреляционной связи, т. е. степени близости ее к функциональной. Корреляционные уравнения дают возможность вычислить вероятные значения одной случайной величины в за-

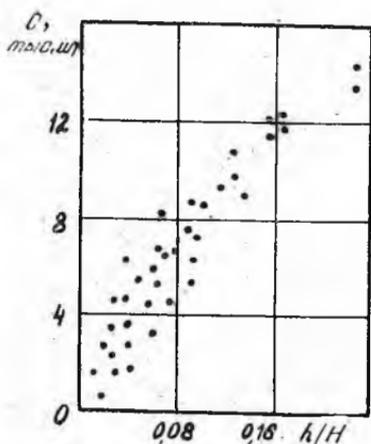


Рис. 12. Поле корреляции стойкости штампа от отношений высоты облойной канавки  $h$  к высоте поковки  $H$

Найдем прямую, которая прошла бы к заданным на границе точкам  $j$  ближе любой другой прямой:

$$C_j \approx a + bx_j (j = \overline{1, n}). \quad (1)$$

Коэффициенты отыскивают из условия, что сумма квадратов разностей между левой и правой частями приближенного уравнений (1) обращается в минимум, т. е.

$$f = \sum_{j=1}^n [C_j - (a + bx_j)]^2 \Rightarrow \min.$$

Значения  $a$  и  $b$ , удовлетворяющие минимуму функции  $f$ , определяются из уравнений

$$\partial f / \partial a = 0 \text{ и } \partial f / \partial b = 0.$$

Производя соответствующие выкладки, получаем систему двух уравнений первой степени относительно неизвестных  $a$  и  $b$ :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n C_j &= na + b \sum_{j=1}^n x_j; \\ \sum_{j=1}^n C_j x_j &= a \sum_{j=1}^n x_j + b \sum_{j=1}^n x_j^2. \end{aligned}$$

Аналогично вычисляются коэффициенты корреляционных уравнений степенного вида  $C = ax^b$ , показательного вида  $C = ab^x$ ,

зависимости от отдельных значений других случайных величин (рис. 12).

Вычисление вероятностных значений по корреляционным уравнениям имеет большую практическую ценность для тех случаев, когда непосредственное определение изучаемого признака затруднено. Основным способом вычисления коэффициентов корреляционных уравнений является способ наименьших квадратов. Пусть искомое корреляционное уравнение приводится к линейному виду

$$C = a + bx,$$

где  $a$  и  $b$  — неизвестные параметры.

логарифмического вида  $C = a + b \lg x$  и периодического вида

$$C = a + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx + b_k \sin kx).$$

Для численного выражения степени тесноты между двумя случайными величинами  $x$  и  $C$  используется коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(C_i - C_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 \sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2}}, \text{ где } x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

В случае линейной зависимости между  $x$  и  $C$  коэффициент  $r = \pm 1$  при полном отсутствии связи  $r = 0$ .

При решении вопроса, будет ли вычисленный коэффициент корреляции  $r$  указывать на какую-либо корреляцию между  $x$  и  $C$ , применяют критерий Стьюдента

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2}, \text{ откуда } |r| > \frac{t}{\sqrt{t^2 + n - 2}},$$

где значения  $t$  находят из таблиц согласно принятому уровню значимости и числу степеней свободы  $f = n - 2$ . Если полученное по этому неравенству значение будет меньше расчетного  $r$ , то можно утверждать наличие зависимости между случайными переменными  $x$  и  $C$ .

При исследовании более двух случайных величин применяется метод математической статистики, называемой *множественной корреляцией*. Особенность и преимущества этого метода заключаются в том, что его применение не требует проведения специальных лабораторных исследований, когда в целях изучения влияния одного фактора стремятся остальные факторы создать постоянными. Для применения метода множественной корреляции вариация многочисленных факторов не представляет какой-либо трудности. Поэтому указанный метод является наиболее эффективным при исследовании закономерностей процессов ОМД в реальных, производственных условиях.

Для определения совместного влияния факторов вычисляют коэффициент множественной корреляции

$$R = \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{10} \\ r_{22} & 1 & r_{23} & \dots & r_{20} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ r_{10} & r_{20} & r_{30} & \dots & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ r_{1k} & r_{2k} & r_{3k} & \dots & 1 \end{vmatrix}}}$$

Здесь индексы от «1» до  $k$  обозначают параметры инструмента, а индекс «0» — стойкость (например,  $r_{10}$  — коэффициент корреляции со стойкостью первого параметра).

Определители решаются согласно правилам линейной алгебры. Отсюда следует, что для двух переменных  $x_1$  и  $x_2$  коэффициент рассчитывается по формуле

$$R = \sqrt{\frac{r_{10}^2 + r_{20}^2 - 2r_{10}r_{20}r_{12}}{1 - r_{12}^2}}$$

При независимых переменных, т. е. при  $r_{12} = 0$ ,  $R = \sqrt{r_{10}^2 + r_{20}^2}$ . По этой же формуле подсчитывается  $R_i$  в том случае, когда имеется  $R_{i-1}$  для  $i-1$  параметров и необходимо найти  $R_i$  при включении  $i$ -го параметра, теснота связи которого  $r_{i0}$ :

$$R_i = \sqrt{R_{i-1}^2 + r_{i0}^2}$$

Весьма актуальным является изучение систем на основе метода многофакторного эксперимента [24]. Поставленная задача решается на основе представления о кибернетической системе, которую называют «черным ящиком» (рис. 13). Он представля-



Рис. 13. Описание входных и выходных параметров системы «штамп» в процессе горячей штамповки

ет собой систему связей, недоступную для наблюдения; так как о содержании, механизме процесса нам ничего не известно или известно лишь частично: известны только входы, переменные  $x$ , участвующие в процессе (факторы), и выходы — результат процесса (параметр оптимизации), обозначенный символом  $Y$ .

Каждый фактор может принимать в опыте одно или несколько значений. Такие значения называются *уровнями*. Схема «черного ящика» позволяет строить математические уравнения, связывающие параметр оптимизации с факторами:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Задача эксперимента состоит в том, чтобы определить численные значения коэффициентов этого уравнения. Обычно функцию  $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$  выбирают в виде степенного ряда. В част-

ности, для двух факторов функция имеет вид полиномов первой степени  $Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$ ; с неполным квадратным членом  $Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$ .

Модель должна быть достаточно точной, т. е. близкой к фактической зависимости. Тогда считают, что она адекватна.

При планировании по схеме полного факторного эксперимента реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Необходимое количество опытов  $N$  при полном факторном эксперименте определяется по формуле  $N = p^k$ , где  $p$  — количество уровней;  $k$  — число факторов. Если эксперименты проводятся на двух уровнях, то постановка опытов по плану называется *полным факторным экспериментом* типа  $2^k$ .

Каждый фактор, участвующий в процессе, имеет определенный предел изменения своей величины. Совокупность всех значений, которые принимает фактор, называется *областью определения фактора*. Но в области определения надо найти локальную подобласть для планирования эксперимента, т. е. для каждого фактора необходимо указать тот интервал изменения параметров, в пределах которого проводятся исследования. Для этого на основании априорной информации устанавливаются ориентировочно значения факторов, комбинации которых дают наилучший результат. Этой комбинации значений факторов соответствует многомерная точка в факторном пространстве, которая принимается за исходную при построении плана эксперимента. Координаты этой точки называются *основными уровнями факторов*.

После того, как основной уровень выбран, переходим к следующему шагу — выбору интервалов варьирования. *Интервалом варьирования* фактора называется некоторое число, прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание — нижний уровень фактора. Поскольку факторы изучаемого процесса неоднородны и имеют различные единицы измерения, их следует привести к единой системе исчисления путем перехода от действительных значений факторов к кодированным по фор-

$$\text{муле } x_j = \frac{\bar{x}_j - \bar{x}_{0j}}{\Delta \bar{x}_j},$$

$$\text{где } \Delta \bar{x}_j = \frac{\bar{x}_{j \max} - \bar{x}_{j \min}}{2}; \quad \bar{x}_{0j} = \frac{\bar{x}_{j \max} + \bar{x}_{j \min}}{2}.$$

$x_j$  — кодированное значение фактора;  $\bar{x}_j$  — натуральное значение фактора;  $\bar{x}_{0j}$  — натуральное значение фактора на основном уровне;  $j$  — номер фактора;  $\Delta \bar{x}_j$  — интервал варьирования.

В безразмерной системе координат верхний уровень равен «+1», нижний соответственно «-1», координаты основного

уровня равны нулю. Для случая  $N = 2^2$  условия проведения эксперимента записываются в виде таблицы, которую называют *матрицей планирования эксперимента* (табл. 1).

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента  $2^2$

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$Y$
1	+	-	-	$Y_1$
2	+	+	-	$Y_2$
3	+	-	+	$Y_3$
4	+	+	+	$Y_4$

Строки в табл. 1 соответствуют различным опытам, столбцы — значениям факторов (единицы для упрощения записи опущены).

Построение матриц планирования основано на правиле чередования знаков. В первом столбце они меняются поочередно, во втором чередуются через два, в третьем — через четыре и т. д. по степеням двойки.

По результатам эксперимента определяются коэффициенты математической модели

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{ij} x_i}{N} . \quad (2)$$

Чтобы привести процедуру вычисления коэффициента  $b_0$  в соответствие с формулой (2), в матрицу планирования введен столбец фиктивной  $x_0$ , которая во всех опытах принимает значение «+ 1». Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента  $b_j$ , тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент имеет знак «+», то с увеличением значения фактора значение  $Y$  увеличивается, а если «-», то уменьшается.

Планируя эксперимент, мы стремимся получить линейную модель. Однако у нас нет уверенности в том, что в выбранных интервалах процесс варьирования описывается линейной моделью. Один из часто встречающихся видов нелинейности связан с тем, что эффект (влияние) одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор. Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценивать эффекты взаимодействия. Для этого следует, пользуясь правилом перемножения столбцов, получить столбец произведения двух факторов (табл. 2).

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента  $2^2$  с эффектом взаимодействия

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2 (x_3)$	$Y$
1	+	-	-	+	$Y_1$
2	+	+	-	+	$Y_2$
3	+	-	+	-	$Y_3$
4	+	+	+	+	$Y_4$

Математическая модель выглядит следующим образом:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2.$$

Коэффициент  $b_{12}$  вычисляется аналогично по формуле (2).

Каждый эксперимент содержит элемент неопределенности вследствие ограниченности информации. Параллельно проведенные опыты не дают полностью совпадающих результатов, потому что всегда существует ошибка опыта (ошибка воспроизводимости). Для ее определения опыт воспроизводится по возможности в одинаковых условиях несколько раз, и затем берется среднее арифметическое всех результатов

$$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n}{n},$$

где  $n$  — число параллельных опытов.

Отклонение результата любого опыта от среднего арифметического можно представить как разность  $(Y_q - \bar{Y})$ , где  $Y_q$  — результат отдельного опыта. Наличие отклонений свидетельствует об изменении значений, полученных при повторных опытах. Для измерения этого различия, чаще всего используют дисперсию опыта, описываемую уравнением  $S_Y^2 = \frac{\sum_{q=1}^n (Y_q - \bar{Y})^2}{f}$ , где  $f$  — число степеней свободы — понятие, учитывающее в статистических ситуациях связи, ограничивающие свободу изменения случайных величин. Значение  $f$  подсчитывается как разность между числом выполненных опытов и числом констант (коэффициентов, средних и т. д.), подсчитанных по результатам тех же опытов. В данном случае  $f = n - 1$ , так как на вычисление значения  $\bar{Y}$  расходуется одна степень свободы.

Для расчета  $S_Y^2$  опыты, заданные матрицей планирования, дублируют  $n$  раз и подсчитывают построчные дисперсии:

$$S_{Yi}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ii} - \bar{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (n-1)},$$

где  $\bar{Y}_{il}$  — результат параметра оптимизации  $l$ -го повторения  $i$ -го опыта;  $\bar{Y}_i$  — среднее арифметическое значение всех повторений  $i$ -го опыта,

$$S_y^2 = \frac{\sum_{l=1}^N S_{yl}^2}{N},$$

т. е. ставится серия одинаковых опытов  $n$ , затем проверяется однородность дисперсий, т. е. выясняется, определяются ли различные значения  $Y$  с одинаковой точностью по критерию Кохрена:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{y \max}^2}{\frac{\sum_{l=1}^N S_{yl}^2}{N}}.$$

Расчетное значение  $G$  — критерия сравнивают с табличным в зависимости от уровня значимости  $\alpha$ , числа степеней свободы  $f = n - 1$  и числа опытов  $N$ . Ряд дисперсий считается однородным, если  $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ .

Уровень значимости  $\alpha$  — мера точности ответа. Для инженерных расчетов подходящим является  $\alpha = 0,05$ , что соответствует вероятности правильного ответа:  $p = 1 - \alpha = 0,95$  или 95%. При этом считают, что в среднем в 5% случаев возможна ошибка.

Коэффициенты модели  $b_j$  считаются значимыми, когда их абсолютная величина больше доверительного интервала, т. е.

$$|b_j| \geq \Delta b_j = t S_{b_j},$$

где  $t$  — критерий Стьюдента (берется из таблиц в зависимости от уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы при определении дисперсии опыта,  $S_{b_j}$  — среднеквадратичная ошибка определения коэффициентов регрессии,  $S_{b_j}^2 = S_y^2/nN$  — дисперсия в определении коэффициентов.

Статистическая незначимость коэффициента интерпретируется как отсутствие влияния соответствующего фактора в изученных интервалах его изменения. Такие коэффициенты из модели исключаются.

Проверка адекватности модели необходима для того, чтобы ответить на вопрос: можно ли использовать полученное уравнение или необходима более сложная модель.

Адекватность модели проверяют с помощью критерия Фишера

$$F_{f_2/f_1} = S_{\text{неад}}^2/S_y^2,$$

где  $S_{\text{неад}}^2$  — дисперсия неадекватности,

$$S^2_{\text{неад}} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i \text{ расч}} - Y_{i \text{ эксп}})^2}{N - k}$$

Здесь  $Y_{i \text{ расч}}$ ,  $Y_{i \text{ эксп}}$  — значения параметра оптимизации в  $i$ -м опыте, соответственно рассчитанные по уравнению регрессии и определенные экспериментально;  $k$  — число коэффициентов уравнения регрессии, включая  $b_0$ .

Гипотеза об адекватности уравнения принимается в том случае, когда рассчитанное значение  $F$ -критерия не превышает табличного для выбранного уровня значимости и числа степеней свободы  $f_1$  и  $f_2$ , с которыми определялись дисперсии неадекватности и опыта, т. е.  $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$ .

В качестве примера рассмотрим построение математической модели, позволяющей контролировать инструмент.

При прессовании профилей формирование винтового оребрения осуществляется путем затекания металла в пазы на матрице (рис. 14, а). При этом движение металла в окружающем направлении происходит за счет неравномерности скоростей истечения в пазах с наклонными рабочими поясками одинаковой по сторо-

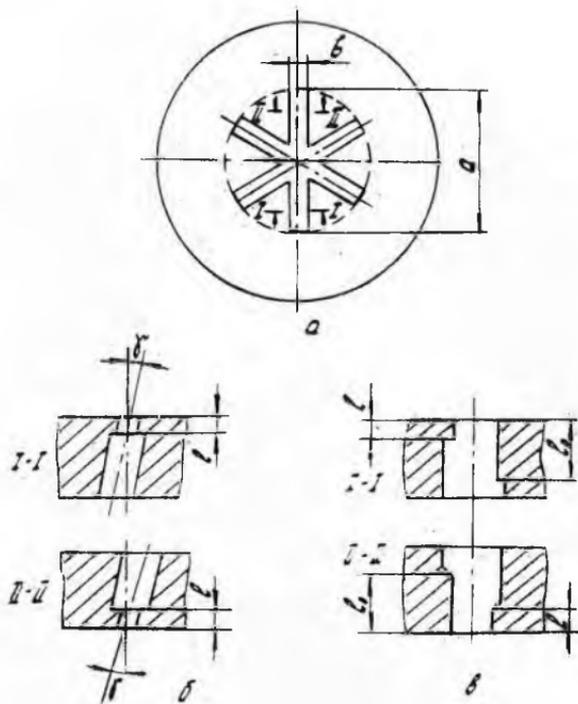


Рис. 14. Матрица для прессования винтовых профилей

нам ребра ширины (рис. 14, б) или в пазах с поясками, параллельными оси прессования, но имеющими различную ширину на противоположных сторонах канала (рис. 14, в).

Ребра профиля в процессе закрутки претерпевают определенную деформацию, обусловленную механизмом процесса. Величина деформации кручения зависит, главным образом, от параметров поясков матрицы и геометрии профиля. Поэтому представляет известный интерес изучение совместного влияния этих факторов на угол закрутки (угол закрутки характеризует поворот сечений, разделенных расстоянием в 1 м, относительно друг друга). Для этой цели использовался метод статистического планирования эксперимента. Кроме того, было принято, что ребристый профиль можно представить как совокупность симметрично расположенных элементов. В силу такой симметрии исследовалась закрутка лишь одного элемента ребристого изделия — профиля с поперечным сечением прямоугольника с размерами  $a$  и  $b$ .

Исследование проводилось по плану дробного факторного эксперимента  $2^{3-1}$  с генерирующим соотношением  $x_3 = x_1x_2$  и определяющим контрастом  $1 = x_1x_2x_3$ . В качестве исследуемых факторов были взяты: относительная высота рабочего пояска  $x_1 = l/l_0$ , где  $l_0$  предельная высота, равная 10 мм; угол наклона плоскости рабочих поясков к оси прессования  $\gamma$  —  $x_2$  (рад); относительная толщина ребра  $a/b = x_3$ , где  $a$  — ширина,  $b$  — толщина ребра. Откликом служил угол закрутки  $\Theta$  (рад/м). Были приняты следующие интервалы варьирования факторов:  $x_1 = 0,25 \dots 0,75$ ;  $x_2 = 0 \dots 0,104$  рад;  $x_3 = 10 \dots 15$  (табл. 3).

Таблица 3

Условия проведения и результаты экспериментов

Номер опыта	$l/l_0$	$\gamma$ , рад	$a/b$	$\Theta$ , рад/м
1	0,25	0	15	7,38
2	0,25	0,104	10	0,34
3	0,75	0	10	0,70
4	0,75	0,104	15	8,71

Опыты проводились на вертикальном гидравлическом прессе ПСУ-250 с усилием 250 т на свинце, т. к. угол закрутки не зависит от природы металла. Условия проведения эксперимента приведены в табл. 3; число повторных опытов было взято равным двум. Порядок проведения опытов был определен по таблице случайных чисел и имел следующую очередность: 6, 5, 2, 8, 4,

7, 3, 1. Прессование слитков осуществлялось без смазки в контейнере диаметром 50 мм. Угол закрутки измерялся с помощью угломера с точностью  $\pm 3^\circ$ .

В результате статистической обработки экспериментальных данных было получено адекватное уравнение регрессии в виде

$$\Theta = 6,53 - 1,83 x_1 + 2,49 x_2 + 1,51 x_3,$$

где  $x_1 = \frac{\bar{x}_1 - 0,5}{0,25}$ ,  $x_2 = \frac{\bar{x}_2 - 0,052}{0,052}$ ,  $x_3 = \frac{\bar{x}_3 - 12,5}{2,5}$

Графическая иллюстрация уравнения приведена на рис. 15. Анализируя диаграмму, можно отметить, что угол закрутки увеличивается с ростом угла наклона плоскости рабочих поясков

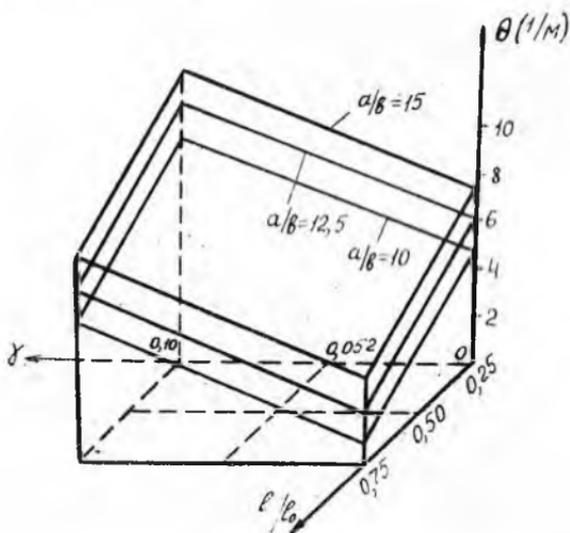


Рис. 15. Влияние параметров матрицы на угол закрутки

и с уменьшением соотношения длин поясков. Наиболее эффективно влияет на угол закрутки угол наклона плоскости рабочих поясков. Полученная зависимость была использована при расчете параметров матрицы, обеспечивающих заданный угол закрутки.

### 2.3. МЕТОДЫ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Один и тот же процесс ОМД может быть по своей экономической эффективности неоднозначным и реализован по различным вариантам, поэтому выбор оптимального варианта можно обосновать только путем вычислений. Для такого обоснования довольно часто используют методы линейного программирования [3, 14, 21 — 23].

В качестве целевой функции  $Y$  принимают, например, себестоимость изготовления металлических полуфабрикатов, степень загрузки оборудования, длительность обработки изделия и т. п. Целевую функцию записывают в виде

$$Y = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n.$$

На переменные  $x_1, x_2, \dots, x_n$  накладывают систему линейных ограничений

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

и граничные условия  $x_j \geq 0$ , где  $j = 1, 2, \dots, n$  — число переменных,  $m$  — число ограничений,  $a_{ij}, b_j, C_j$  — постоянные величины.

Задача линейного программирования формулируется следующим образом: нужно найти неотрицательные значения  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , обращающие целевую функцию  $Y$  в экстремум (максимум или минимум) и удовлетворяющие ограничениям. Например, для любого процесса ОМД себестоимость изготовления детали (целевая функция) определяется выражением

$$Y = C_m + C_z + C_n + C_{об} \rightarrow \min,$$

где  $C_m, C_z, C_n$  и  $C_{об}$  — удельные затраты на основной материал, зарплату производственных рабочих, инструмент и оборудование соответственно. Нужно выбрать такие значения  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (параметры процесса), при которых себестоимость будет минимальной.

В качестве примера использования линейного программирования рассмотрим следующую задачу.

Инструментальный цех выпускает штампы двух видов:  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . На эти изделия идут четыре вида материала:  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$  (табл. 4).

Сколько штампов  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  надо изготовить, чтобы при данных запасах материалов получить наибольшую выручку, если стоимость одного штампа  $\Pi_1$  — 70 р.,  $\Pi_2$  — 50 р.?

Таблица 4

Затраты материалов на штампы

Материалы	Запасы материалов, шт	Штампы	
		$\Pi_1$	$\Pi_2$
$S_1$	19	2	3
$S_2$	13	2	1
$S_3$	15	0	3
$S_4$	18	3	0

Предположим, что цех выпускает штампов  $\Pi_1 \rightarrow x_1$ ,  $\Pi_2 \rightarrow x_2$ . Тогда целевая функция  $L = C_1x_1 + C_2x_2 \rightarrow \max$ , где  $C_i$  — стоимость штампов. На первый штамп  $\Pi_1$  израсходуется материала  $S_1 \rightarrow a_{11}x_1$ , на второй  $\Pi_2 \rightarrow a_{12}x_2$ , на все штампы —  $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \leq b_1$ , где  $b_1$  — запасы материала  $S_1$ . Аналогичным путем находят и другие ограничения. В конечном итоге получим

$$\begin{aligned} 2x_1 + 3x_2 &\leq 19, \\ 2x_1 + x_2 &\leq 13, \\ 3x_2 &\leq 15, \\ 3x_1 &\leq 18. \end{aligned} \quad (3)$$

Надо найти такие числа  $x_1$  и  $x_2$ , удовлетворяющие неравенствам, при которых целевая функция имеет наибольшее возможное значение.

Задачу можно решить чисто геометрическим способом в координатах  $x_1, x_2$ . Каждая прямая неравенства делит плоскость на две полуплоскости. По одну сторону от граничной прямой располагаются точки, удовлетворяющие неравенству, по другую — не удовлетворяющие. В совокупности на плоскости  $x_1x_2$  граничные прямые образуют многоугольник — область изменения переменных (рис. 16). После вычисления целевой функции в каждой вершине многоугольника найдем, что наименьшую выручку цех получит при изготовлении штампов  $\Pi_1 = 5$  шт и  $\Pi_2 = 3$  шт.

#### 2.4. МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Технологические процессы ОМД являются многостадийными, включающими, например, операции резки  $W_{11}$ , нагрева  $W_{12}$ , деформирования  $W_{13}$  и т. п. (рис. 17). При выборе

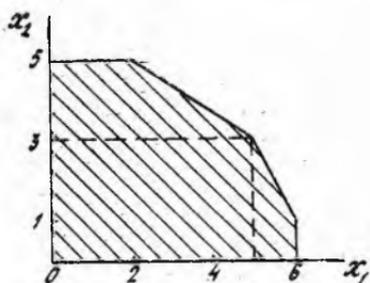


Рис. 16. Графическое представление области решений системы неравенств (3)

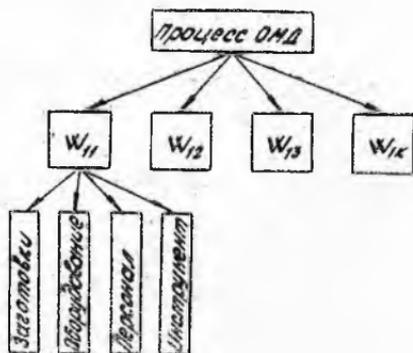


Рис. 17. Схема процессов ОМД

оптимального технологического процесса с точки зрения расхода металла, трудоемкости можно применять *динамическое программирование* [18, 21].

В динамическом программировании рассматриваются много-стадийные процессы принятия решений оптимального варианта. Решения принимают на каждой стадии исходя из интересов всего процесса в целом, на основе *принципа оптимальности*. «Некоторая стратегия (последовательность принятых решений) оптимальна, если в течение данного периода, каковы бы ни были предшествующие решения—решения, которые остается принять, образуют оптимальную стратегию» [6].

Алгоритм метода динамического программирования заключается в следующем. Пусть дано  $n$  функций  $f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)$ . Нужно определить минимум или максимум функции

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n) \rightarrow \min,$$

причем на переменные  $x_1, x_2, \dots, x_n$  наложены ограничения, при которых этот минимум существует. Пусть это ограничение в нашем случае есть  $x_1 + x_2 + \dots + x_n = A$ . Тогда, чтобы найти  $F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min [f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n)]$ , нужно вычислить функции поэтапно:

$$F_{1,2}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min [f_1(x_1) + f_2(A - x)],$$

$$F_{1,2,3}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min [F_{1,2}(x) + f_3(A - x)],$$

$$F_{1,2,\dots,n-1}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min [F_{1,2,\dots,n-2}(x) + f_{n-1}(A - x)],$$

$$F_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min [F_{1,2,\dots,n-1}(x) + f_n(A - x)].$$

Записанная система уравнений — есть функциональные рекуррентные уравнения метода динамического программирования.

На рис. 18 показана сеть траекторий изготовления поковок, передвигаясь по которым нужно попасть из начального узла 1 в конечный узел 6. Требуется найти путь, при перемещении по которому затрачивается наименьшее время. Время передвижения от узла к узлу указано у линий, соединяющих узлы. Функциональные уравнения имеют вид

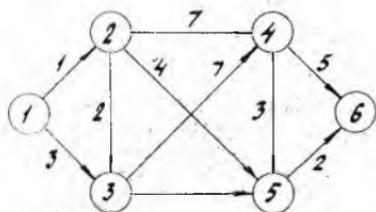


Рис. 18. Сеть траекторий

$$f_i = \min (t_{i,j} + f_j); f_6 = 0,$$

$$f_5 = \min (t_{5,6} + f_6) = \min (2 + 0) = 2,$$

$$f_4 = \min \left\{ \begin{array}{l} t_{4,5} + f_5 \\ t_{4,6} + f_6 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 3 + 2 = 5 \\ 5 + 0 = 5 \end{array} \right\} = 5,$$

$$f_3 = \min \left\{ \begin{array}{l} t_{3,4} + f_4 \\ t_{3,5} + f_5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 7 + 5 = 12 \\ 3 + 2 = 5 \end{array} \right\} = 5,$$

$$f_2 = \min \left\{ \begin{array}{l} t_{2,4} + f_4 \\ t_{2,5} + f_5 \\ t_{2,3} + f_3 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 7 + 5 = 12 \\ 4 + 2 = 6 \\ 2 + 5 = 7 \end{array} \right\} = 6,$$

$$f_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} t_{1,2} + f_2 \\ t_{1,3} + f_3 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 6 = 7 \\ 3 + 5 = 8 \end{array} \right\} = 7,$$

где  $f_i$  — наименьшее время, необходимое для передвижения от узла  $i$  к конечному узлу 6 по допустимым путям с использованием оптимальной стратегии.

Таким образом, наименьшее время равно 7, а траектория проходит через узлы 1—2—5—6.

Пусть эффективность технологического процесса характеризуется показателем  $W$  (назовем его выигрыш). Предположим, что выигрыш  $W$  складывается из выигрышей на отдельных  $i$ -х шагах  $\omega_i$ :

$$W = \sum_{i=1}^m \omega_i,$$

где  $m$  — количество шагов.

На каждом шаге мы можем выбирать какие-то параметры, влияющие на его ход и исход и соответственно на выигрыш на данном шаге и выигрыш для системы в целом. Будем называть это решение «шаговым уравнением» и обозначим буквами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Управление для системы в целом  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Требуется найти такое управление  $x$ , при котором выигрыш  $W$  обращается в максимум

$$W = \sum_{i=1}^m \omega_i \rightarrow \max.$$

То управление  $x^*$ , при котором максимум достигается, будем называть *оптимальным управлением*. Оно состоит из совокупности оптимальных шаговых управлений

$$x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}.$$

Тот выигрыш, который достигается при этом управлении, обозначим

$$W^* = \max_x \{W(X)\}.$$

Планируя многошаговую операцию, надо выбирать управление на каждом шаге с учетом всех его будущих последствий на еще предстоящих шагах. Управление на  $i$ -м шаге выбирается не так, чтобы выигрыш именно на этом шаге был максимален, а так, чтобы была максимальной сумма выигрышей на всех оставшихся до конца шагах плюс данный выигрыш. Последний шаг можно планировать так, чтобы он сам, как таковой, принес наибольший выигрыш. Поэтому процесс динамического программирования

ния обычно разворачивается от конца к началу. Прежде всего планируется последний  $n$ -й шаг, но мы не знаем условий, в которых приступаем к последнему шагу. Вот тут-то и начинается самое главное. Планируя последний шаг, нужно сделать разные предположения о том, чем кончился предпоследний ( $n - 1$ ) шаг и для каждого из этих предположений найти условное оптимальное управление на  $n$ -шаге.

Предположим, что мы это сделали, и для каждого из возможных исходов предпоследнего шага знаем условное оптимальное управление и соответствующий ему условный оптимальный выигрыш на  $n$ -шаге. Теперь можно оптимизировать управление на предпоследнем  $n - 1$  шаге. Снова сделаем предположение о том, чем кончился предыдущий  $n - 2$  шаг и найдем такое управление на  $n - 1$  шаге, при котором выигрыш за два последние шага максимальный. Далее, двигаясь назад, дойдем до первого шага. Теперь уже можем построить не условно оптимальное, а просто оптимальное управление  $x^*$ , обеспечивающее оптимальный выигрыш  $W^*$ .

Таким образом, в процессе оптимизации методом динамического программирования расчеты проводятся дважды: первый раз — от конца к началу; второй — от начала к концу.

На рис. 19 даны различные способы изготовления некоторой детали, например, шестерни в виде ориентированного графа, вершины которого разбиты на  $p$ -уровней. Выбор технологического процесса состоит в наборе таких вершин. Из вершины «Начало» можно попасть в вершину «Конец», двигаясь по стрел-

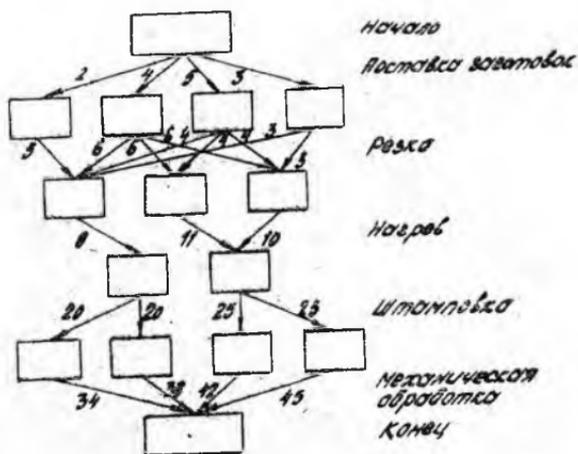


Рис. 19. Выбор оптимального технологического процесса горячей штамповки

кам, соединяющим указанные вершины. Цифры у стрелок — трудоемкость перехода. Оптимальный технологический процесс — это процесс, дающий критерию трудоемкости наименьшее значение.

## 2.5. МЕТОДЫ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Решение проблем планирования и управления сложных систем представляет большие трудности в связи с тем, что возникает необходимость в совместной работе нескольких различных коллективов (исполнителей), а также в согласовании сроков выполнения отдельных разделов работы и осуществлении руководства.

Одними из эффективных способов планирования и управления являются *сетевые методы*, широко применяемые как при создании новых систем, так и их моделировании [14]. К достоинствам сетевых методов можно отнести:

научно обоснованное планирование работ с учетом стоимости качества и времени окончания как для каждой отдельной работы, так и для всего комплекса в целом;

выявление напряженных участков работ и фокусирование внимания на этих работах;

возможность контроля сложных планов;

четкое разграничение ответственности каждого исполнителя; сравнительная простота, наглядность.

*Сетевой график* — это информационная динамическая модель, отображающая взаимосвязь и процесс выполнения комплекса операций, в которой весь комплекс операций расчленяется на отдельные работы, располагаемые в строго технологической последовательности, для достижения четко определенных целей. Целью может являться окончание строительства объекта, создание уникального изделия, выполнение научно-исследовательской работы и т. п.

*Работа* — протекающий во времени процесс, требующий материальных и трудовых ресурсов, например, процесс скальпирования слитков, процесс оформления эскизного проекта и т. п. Обозначается работа на графике стрелкой, над которой пишется цифра — количество дней (или недель, часов и т. п.), необходимое для ее выполнения.

*Событие* — результат окончания работы, например, заготовка установлена в штамп, технический проект принят комиссией и т. п. Длительность события равна нулю. На графике событие обозначается кружочком (узлом), в который входят и из которого выходят стрелки, обозначающие работу.

Связная совокупность работ и событий образует сетевой

график (рис. 20). Процесс построения сетевого графика состоит в графическом упорядочении всех работ и событий, т. е. в перечислении для каждой работы начальных и конечных событий.

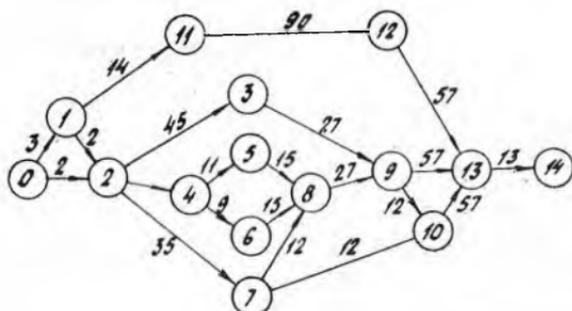


Рис. 20. Сетевой график проведения эксперимента по комплексному исследованию процесса прокатки: 0 — получение задания; 1 — изучение литературы; 2 — составление программы эксперимента; 3 — изготовление образцов; 4 — изготовление валков; 5 — сборка валкового узла; 6 — наладка и монтаж тензометрических схем; 7 — изготовление вспомогательного оборудования; 8 — окончательная отладка всех систем; 9 — проведение эксперимента; 10 — получение первичных опытных данных; 11 — продолжение изучения литературы; 12 — разработка методики обработки опытных данных; 13 — обработка опытных данных; 14 — составление отчета

Расчет сетевого графика состоит в вычислении критического пути и сроков начала и конца свершения событий. Последовательность работ от начального до конечного события образует на сетевом графике путь. Начальное событие характеризуется тем, что в него не входит ни одна стрелка, а конечное тем, что из него не выходит ни одна стрелка. Начальное событие соответствует началу работ, а конечное — завершению всех работ (достижение поставленной цели). Путь, имеющий наибольшую продолжительность времени, называется *критическим*.

Любое событие может наступить только тогда, когда завершены все предшествующие ему работы. Отсюда следует, что *ранний срок свершения события*  $t^p$ ; будет равен сумме всех работ, лежащих на наиболее длинном пути. С другой стороны, *поздний срок свершения события*  $t^n$ ; представляет собой самый поздний возможный срок наступления данного события, при котором не наступает задержки раннего свершения завершающего события графика.

Величина разности между поздним и ранним сроками свершения события называется *резервом времени события*  $P_i$ .

$$P_i = t_i^n - t_i^p,$$

где  $i$  — номер события.

*Под ранним сроком начала работы*  $t_{i-j}^{pn}$  подразумевается самый ранний возможный срок начала данной работы, этот срок равен раннему сроку свершения предшествующего события:  $t_{i-j}^{pn} = t_i^p$ .

*Ранний срок окончания работы*  $t_{i-j}^{po}$  — наиболее ранний возможный срок окончания работы; этот срок равен сумме раннего начала и ожидаемой продолжительности работы:  $t_{i-j}^{po} = t_{i-j}^{pn} + t_{i-j}$ .

*Поздний срок окончания работы*  $t_{i-j}^{no}$  — это самый поздний срок окончания работы, при котором еще не происходит задержки раннего свершения завершающего события:  $t_{i-j}^{no} = t_i^n$ .

*Поздний срок начала работы*  $t_{i-j}^{nn}$  — наиболее поздний срок начала работы, не приводящий к задержке свершения завершающего события графика:

$$t_{i-j}^{nn} = t_{i-j}^{no} - t_{i-j} = t_i^n - t_{i-j}.$$

*Полный резерв времени работы*  $P_{i-j}^n$  — максимальное время, на которое можно увеличивать продолжительность данной работы, не изменив продолжительности критического пути  $t_{кр}$ :

$$P_{i-j} = t_{i-j}^{no} - t_{i-j}^{po} \quad \text{или} \quad P_{i-j} = t_{i-j}^{nn} - t_{i-j}^{pn}.$$

## Задачи к разд. 2

2.1. Как вы считаете, можно ли поставить эксперимент на абстрактной математической модели?

2.2. В исследовании изучалось влияние трех факторов, каждый из которых изменялся на четырех уровнях. Найти необходимое число опытов.

2.3. В исследовании изучалось влияние трех факторов. Первый фактор изменялся на двух уровнях, второй — на трех уровнях, а третий — на четырех уровнях. Найти необходимое число опытов.

2.4. План и результаты эксперимента  $2^{4-1}$  представлены матрицей.

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_{13}$	$x_{23}$	$x_{34}$	Y
1	+	+	+	+	+	+	+	+	296
2	+	+	-	+	-	+	-	-	122
3	+	-	-	+	+	-	-	+	239
4	+	-	+	+	-	-	+	-	586
5	+	+	+	-	+	-	-	-	232
6	+	+	-	-	-	-	+	+	292
7	+	-	-	-	+	+	+	-	539
8	+	-	+	-	-	+	-	+	383

Требуется построить математическую модель и провести ее анализ.

2.5. В цехе имеется два штамповочных прессы, с помощью которых штампуют изделия трех классов (табл. 5).

Таблица 5

Исходные данные

Изделие	Цена, коп/кг	Часовая произво- дитель- ность, кг	Стоимость металла, коп/кг	Способ получения заготовки
1	23	2000	18	Литье, не более 4000 кг в сутки
2	26	1500	20	Закупка в любом количестве
3	40	1000	25	Закупка, но не более 12000 кг в сутки

Производительность оборудования для термообработки и отгрузки готовой продукции не позволяет превысить суточный уровень производства, чтобы максимизировать прибыль? Сформулировать задачу линейного программирования.

2.6. Определить все параметры сетевой модели, показанной на рис. 20.

2.7. Дана формула  $C = kx^a y^b z^c$ . Каким образом от указанной модели можно перейти к линейной модели  $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$ ?

2.8. Цех выпускает металлические винты двух типов. Винты А изготавливаются из нержавеющей стали, а винты Б — из мягкой стали. Стоимость винтов А — 2 р., а винтов Б — 1 р. за тысячу. Однако вследствие того, что нержавеющая сталь более твердая, технологический процесс изготовления винтов из такого материала более длителен. За один день на всех станках можно изготовить винтов Б — 100 тыс., винтов А — 20 тыс. Общего ко-

личества используемого материала в сутки хватает на изготовление 65 тыс. винтов, причем нержавеющей стали — только на 15 тыс. винтов. Сформулировать задачу линейного программирования и решить ее.

2.9. План и результаты эксперимента  $2^2$  представлены матрицей:

Номер винта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$y$
1	+	—	—	1,68
2	+	—	+	1,16
3	+	+	—	0,74
4	+	+	+	0,39

Определить коэффициенты модели и дать геометрическую интерпретацию модели.

2.10. Определить оптимальный технологический процесс, при котором критерий трудоемкости имеет наименьшее значение (по рис. 19).

### 3. КРИТЕРИИ ВЫБОРА СИСТЕМ

#### 3.1. ПОНЯТИЕ КРИТЕРИЯ

При анализе и синтезе систем (технологических процессов ОМД) возникает множество различных альтернатив, из которых инженеру нужно выбрать оптимальные с точки зрения

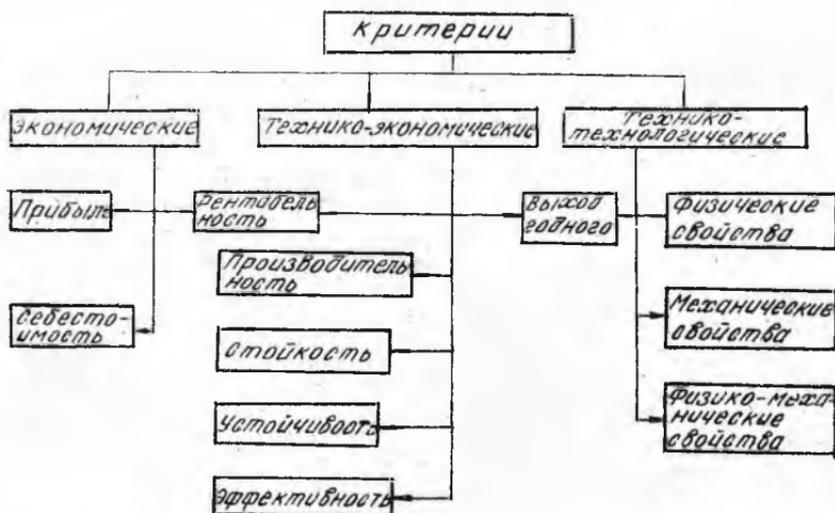


Рис. 21. Классификация целевых величин

эффективности (предпочтительности). Чтобы сравнить различные альтернативы по эффективности, нужно иметь какие-то критерии (показатель эффективности, целевая функция). Критерий должен быть универсальным, количественным, простым и легко вычисляемым, иметь физический смысл. Лучшим будет тот критерий, который в максимальной степени способствует достижению поставленной цели. Очень часто в качестве критериев принимают выходные переменные системы. К их числу относят переменные, характеризующие экономическую эффективность процесса, а также технико-экономические параметры, технологические свойства и характеристики готовых изделий (рис. 21).

Чем сложнее система, тем больше критериев, так как в этом случае эффективность не может быть охарактеризована с помощью одного единственного критерия. На помощь приходится привлекать другие, дополнительные. Такие системы называются *многокритериальными*. Например, организуется работа кузнечно-штамповочного цеха. Исходя из какого критерия надо выбрать решение? С одной стороны, хочется обратить в максимум валовой объем продукции. Желательно также получить максимально чистый доход, минимальную себестоимость, максимальную производительность труда и т. п. Можно ли найти решение, одновременно удовлетворяющее всем требованиям? Нет! Поэтому формулировка: достигнуть максимум эффекта при минимальных затратах — представляет собой не более, чем фразу, и при научном анализе должна быть отброшена. Как же быть?

Рассмотрим систему с двумя критериями  $q_1$  и  $q_2$ . Каждой альтернативе на графике (рис. 22) соответствуют определенные

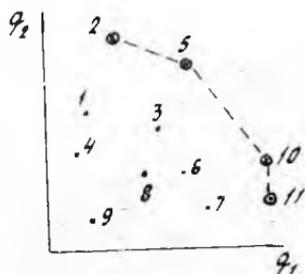


Рис. 22. Система с двумя критериями  $q_1$  и  $q_2$

показатели  $q_1$  и  $q_2$ , которые, например, надо максимизировать. Эффективные решения — только решения  $x_2, x_5, x_{10}, x_{11}$ , лежащие в правой верхней границе. Для всякого другого решения существует хотя бы одно доминирующее, для которого либо  $q_1$ , либо  $q_2$ , либо оба больше, чем для данного. И только на границе доминирующих не существует. Когда из множества альтернатив выделены эффективные, то дальнейший выбор строится на множестве эффективных. Из них решение

$x_{11}$  — лучшее по критерию  $q_1$ , решение  $x_2$  — по критерию  $q_2$ . Дело инженера, принимающего решение, его прерогатива — выбрать тот вариант, который для него предпочтителен и приемлем по обоим критериям.

Сформулируем критерии, которые должны быть использованы при постановке задач проектирования и совершенствования процессов ОМД. К числу таких критериев необходимо прежде всего отнести показатели качества изделий (табл. 6), а также параметры технологического процесса и оборудования, определяющие качество изделий и эффективность металлургического производства.

Т а б л и ц а 6

Показатели качества изделий

Группа	Показатели
Геометрические характеристики изделий	Точность размеров, допуски на размеры Выполнение формы изделия
Механические характеристики материала изделия	$\sigma_b$ , $\sigma_t$ , $\delta$ , $\Psi$ , $a_k$ , твердость Изменение механических свойств по длине и по сечению
Качество поверхности	Шероховатость, наличие дефектов
Структура металла	Текстура деформации, величина зерна, однородность структуры
Эксплуатационные характеристики	Коррозионная стойкость, усталостная прочность, краскостойкость

Указать универсальный критерий эффективности для процессов ОМД в силу их многоцелевого характера, естественно, невозможно, хотя попытки такого рода предпринимаются довольно часто.

### 3.2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБОБЩЕННЫХ КРИТЕРИЕВ

Формирование обобщенных критериев для анализа и синтеза, перестав быть только «искусством», основанным на инженерной интуиции, превратилось в серьезное научное направление. Путь к единому критерию часто лежит через обобщение.

Пусть имеется множество альтернатив (вариантов построения системы), причем каждая альтернатива  $a$  характеризуется определенной совокупностью свойств  $\vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ .

Имеется совокупность критериев  $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ , отражающих количественно множество свойств системы, т. е. каждая альтернатива характеризуется вектором:

$$\vec{q}(a) = [q_1(\vec{a}), q_2(\vec{a}), \dots, q_i(\vec{a}), \dots, q_n(\vec{a})].$$

Необходимо принять решение о выборе одной из альтернатив. Решение простое — если произвести выбор по одному критерию, сложное — если выбранная альтернатива не является лучшей по какому-либо одному критерию, но может оказаться приемлемой для всей их совокупности. Задача принятия решения по выбору альтернативы на множестве критериев формально сводится к отысканию отображения, которое каждому вектору ставит в соответствие действительное число

$$E = \varphi(\bar{q}) = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n).$$

Оператор  $\varphi$  называется *интегральным* (обобщенным) *критерием*. Оператор присваивает каждому решению по выбору альтернативы соответствующее значение эффективности  $E$ . Это позволяет упорядочить множество решений по степени предпочтительности.

Наиболее простой и часто применяемый метод заключается в том, что один из наиболее важных с точки зрения цели системы критериев  $q_k$  принимается в качестве обобщенного, а все остальные учитываются в виде ограничений, определяющих область допустимых альтернатив:

$$E = q_k, \quad q_i \geq q_i^{(0)}, \quad i = 1, 2, \dots, l;$$

$$q_i \leq q_i^{(0)}, \quad i = l + 1, l + 2, \dots, n; \quad i \neq k,$$

где  $q^0 = (q_1^{(0)}, q_2^{(0)}, \dots, q_n^{(0)})$  — вектор, определяющий допустимые значения по всем критериям. Например, нужен сплав, имеющий наибольший уровень жаропрочности и обладающий пластичностью, свариваемостью, коррозионной стойкостью и т. п. не выше заданной. В качестве обобщенного критерия взята жаропрочность, а остальные критерии взяты в виде ограничений. Основным недостатком метода является то, что альтернативы оцениваются только по данному критерию, а значения других критериев, если они не удовлетворяют ограничениям, не учитываются.

В ряде случаев обобщенный показатель эффективности записывают, используя аддитивные и мультипликативные преобразования над выбранной системой частных критериев  $q_i$ . Тогда

$$E = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n) = \sum_{i=1}^n b_i q_i,$$

где  $b_1, \dots, b_n$  — положительные или отрицательные коэффициенты, причем, положительные ставятся при тех критериях, которые желательно максимизировать, а отрицательные — при тех, которые желательно минимизировать, при условии, что ищется  $E_{\max}$ . Пусть, например, цель состоит в максимизации объема производства кузнечно-штамповочного цеха  $q_1$  и минимизации

объема брака  $q_2$ . Тогда показатель эффективности примет вид

$$E = b_1 q_1 - b_2 q_2.$$

Поскольку с ростом  $q_1$  возрастает и  $q_2$ , то в выражении обобщенного критерия  $E$  нужно взять  $b_1$  со знаком плюс, а  $b_2$  — со знаком минус, так как объем производства в соответствии с целью оптимизации следует увеличить, а объем брака желательно уменьшить. Выбор «весов» коэффициентов осуществляет инженер на основе анализа степени важности частных критериев  $q_i$ .

В случае использования мультипликативного преобразования обобщенный критерий формируется следующим образом:

$$E = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n) = \prod_{i=1}^n q^{\lambda_i},$$

где  $\lambda_i$  — некоторые вещественные числа.

Обобщенный критерий может оцениваться расстоянием между идеальной и рассматриваемой альтернативами. Чем ближе качество рассматриваемой альтернативы к идеальной, тем она лучше. Пусть  $\vec{q} = (q_1^0, q_2^0, \dots, q_n)$  — идеальная альтернатива, тогда обобщенный критерий может быть записан в виде суммы отклонений от идеальной альтернативы для частных критериев одной размерности:

$$E = Y(q_1, q_2, \dots, q_n) = \sum_{i=1}^l (q_i^0 - q_i) + \sum_{i=l+1}^n (q_i - q_i^0),$$

где  $q_i, i = 1, 2, \dots, l$  — частные критерии, подлежащие максимизации,  $q_i, i = l + 1, l + 2, \dots, n$  — частные критерии, подлежащие минимизации.

В этом случае значение  $b_i$  отражает полезность критерия  $q_i$  при принятии сложного решения о выборе альтернативы. Значения определяются в результате опроса группы экспертов. Каждый  $j$ -й эксперт вначале определяет набор чисел  $C_{ij}$ , отражающих его мнение об относительной ценности критерия, причем числа записаны в произвольном масштабе. Затем они масштабируются. В результате

$$b_{ij} = C_{ij} / \sum_{i=1}^n C_{ij}, \quad \sum_{i=1}^n b_{ij} = 1.$$

Окончательные значения коэффициентов  $b_i$  получаются в результате осреднения значений  $b_{ij} (j = 1, 2, \dots, m)$ , полученных от всех экспертов. Если компетентность экспертов в группе считается одинаковой, то

$$b_i = 1/m \sum_{j=1}^m b_{ij}.$$

Каждый критерий имеет свой физический смысл и свою размерность. Чтобы объединить различные критерии, приходится вводить для каждого из них некоторую безразмерную шкалу. Шкала должна быть однотипной для всех объединяемых критериев — это делает их сравнимыми. Одна из простейших шкал содержит два значения: «0» — неудовлетворительное качество, «1» — удовлетворительное качество. Рассуждая таким образом, для построения обобщенного критерия удобно воспользоваться формулой

$$E = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n q_i},$$

где  $\prod_{i=1}^n$  — произведение частных критериев  $q_1, q_2, \dots, q_n$ .

Одним из наиболее удобных способов построения шкалы является обобщенная функция желательности Харрингтона. В основе построения этой обобщенной функции лежит идея преобразования натуральных значений частных критериев в безразмерную шкалу желательности:

Желательность	Очень хорошо	Хорошо	Удовлетворительно	Плохо	Очень плохо
---------------	--------------	--------	-------------------	-------	-------------

Отметки на шкале желательности: 1,00 ... 0,80 0,80 ... 0,63 0,63 ... 0,37 0,37 ... 0,20 0,20 ... 0,00

Значение частного критерия, переведенное в безразмерную шкалу желательности, обозначается через  $d_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Шкала желательности имеет интервал от нуля до единицы. Значение  $d_i = 0$  соответствует абсолютно неприемлемому уровню данного критерия, а значение  $d_i = 1$  — самому лучшему значению критерия. Понятию «очень хорошо» соответствуют значения на шкале желательности  $1,0 > d_i > 0,8$ , а понятию «очень плохо»  $0,0 < d_i < 0,2$ . Значение  $d_i = 0,37$  обычно соответствует границе допустимых значений.

На рис. 23 представлены кривые функции желательности для критериев, ограниченных с одной стороны и с двух сторон. На оси ординат нанесены значения желательности, изменяющиеся от 0,0 до 1,0. На оси абсцисс указаны значения критерия, записанные в условном кодированном масштабе. К числу критериев, ограниченных с одной стороны, относят, например, характеристики деформируемого металла: сопротивление деформации  $\sigma_s$ , коэффициент запаса  $K_z$ , ударная вязкость и т. п. Примерами двустороннего ограничения могут быть погонный вес изделия  $G$ , температурный интервал деформирования, размеры заготовки и т. п.

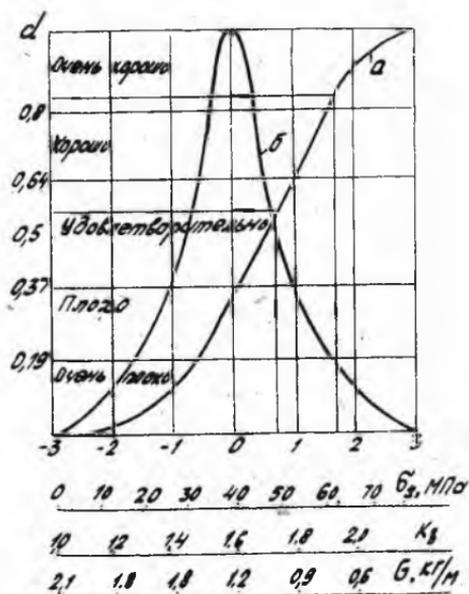


Рис. 23. Функция желательности для критерия, ограниченного с одной стороны (а), и критерия, ограниченного с двух сторон (б)

После того как выбрана шкала желательности и частные критерии  $q_i$  преобразованы в частные функции желательности  $d_i$ , находят обобщенную функцию желательности

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i},$$

которую можно рассматривать в качестве обобщенного критерия.

### 3.3. МЕТОДЫ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

*Методы экспертных оценок* — это логические приемы и математические методы, применяемые при сборе, обобщении и анализе информации, полученной от специалистов [4]. Они широко применяются при выборе наилучшего варианта технологического процесса ОМД, оценке качества металлопродукции, определении полезности рассматриваемых критериев.

При решении практических задач ОМД часто оказывается, что различные объекты (критерии, системы, альтернативы, си-

туации, факторы) не поддаются непосредственному измерению. Расположение этих объектов в порядке возрастания (или убывания) какого-либо присущего им свойства (критерия) называется *ранжированием*. Ранжирование позволяет выбрать из исследуемой совокупности объектов наиболее существенный. Если объекты имеют различную природу и вследствие этого несоизмеримы (т. е. нет у них общего эталона сравнения), то в таких случаях установление относительной значимости с помощью экспертов облегчает выбор наиболее предпочтительного объекта.

При ранжировании эксперт должен расположить объекты (критерии) в порядке, который представляется ему наиболее рациональным, и приписать каждому из них числа натурального ряда — *ранги*. При этом первый ранг получает наиболее предпочтительный критерий, а последний ранг — наименее предпочтительный. Следовательно, порядковая шкала, получаемая в результате ранжирования, должна удовлетворять условию равенства числа рангов числу ранжируемых объектов  $N$ . Для проведения ранжирования применяют анкеты опроса специалистов.

#### АНКЕТА ОПРОСА СПЕЦИАЛИСТА

*Цель:* определение основных факторов, определяющих формирование остаточных сборочных напряжений при изготовлении ребристых многоканальных труб волоочением.

На основании обработки литературных данных установлены следующие факторы:

Ранг	Код	Факторы
	$x_1$	Отношение диаметра к толщине оболочки
	$x_2$	Отношение пределов текучести материалов сердечника и оболочки
	$x_3$	Отношение модулей упругости материалов сердечника и оболочки
	$x_4$	Вытяжка по оболочке
	$x_5$	Обжатие по сердечнику
	$x_6$	Форма и размеры ребра
	$x_7$	Число ребер сердечника
	$x_8$	Скорость волочения
	$x_9$	Диаметр описанной окружности сердечника
	$x_{10}$	Конфигурация канала волокна (радиусная, коническая).

Вам предлагается расположить все перечисленные выше факторы в порядке убывания степени их влияния на формирование остаточных напряжений. Фактору, оказывающему наибольшее влияние, присвоить ранг «1», последующему ранг «2» и т. д. Присвоенные ранги следует записать в столбец слева против соответствующего фактора.

В тех случаях, когда эксперт не в состоянии указать порядок следования двух или нескольких объектов, он присваивает разным объектам один и тот же ранг, и в результате число рангов оказывается не равным числу ранжируемых объектов. В таких случаях объектам присваивают так называемые *стандартизованные ранги*. Например, шести объектам присвоены следующие ранги:

$i$	1	2	3	4	5	6
$x_i$	1	2	3	3	2	3

Тогда объектам 2 и 5, поделившим между собой 2, 3-е места, присписываются стандартизованные ранги  $x_{2,5} = (2 + 3)/2 = 2,5$ , а объектам 3, 4 и 6, поделившим 4, 5 и 6-е места,  $x_{3,4,6} = (4 + 5 + 6)/3 = 5$ . В итоге получим

$i$	1	2	3	4	5	6
$x_i$	1	2,5	5	5	2,5	5

Таким образом, сумма рангов  $S_N$ , полученных в результате ранжирования  $n$  объектов, будет равна сумме чисел натурального ряда, т. е.  $S_N = \sum_{i=1}^n x_i = [(n + 1)n]/2$ , где  $n$  — число объектов.

Когда ранжирование проводится несколькими специалистами  $m$ , тогда обычно для каждого объекта подсчитывают:

1. Сумму рангов  $\sum_{j=1}^m x_{ij}$ , где  $x_{ij}$  — ранг  $i$ -го объекта, присвоенного  $j$ -специалистом (табл. 7).

Таблица 7

Эксперты	Объекты					
	1	2	...	$i$	...	$n$
1	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1i}$	...	$x_{1n}$
2	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2i}$	...	$x_{2n}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$j$	$x_{j1}$	$x_{j2}$	...	$x_{ji}$	...	$x_{jn}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mi}$	...	$x_{mn}$

$\sum_{j=1}^m x_{ij}$	
$\Delta_i$	
$\Delta^2_i$	

2. Отклонение суммы рангов от средней суммы рангов

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}.$$

3. Коэффициент конкордации Кендала

$$W = S/S_{\max} = 12 S/m^2(n^3 - n),$$

где  $S$  — реальная сумма отклонений  $\Delta_i$ , т. е.  $S = \sum_{i=1}^n \Delta_i$ ,

$S_{\max}$  — максимально возможная сумма,  $S_{\max} = [m^2(n^3 - n)]/12$ .

Величина  $W$  изменяется от 0 до 1. При  $W = 0$  связь между ранжировками отсутствует, при  $W = 1$  — все эксперты дают одинаковые ранжировки.

Если в ранжировках присутствуют совпадающие ранги, то,

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j},$$

где  $T_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n (t_i^3 - t_i)$ ,  $t_i$  — число повторений  $i$  ранга в  $j$ -м ряду.

Установлено, что при  $n > 7$  величина  $m(n-1)W$  подчиняется  $\chi^2$  распределению с  $f = n - 1$ , где  $f$  — число степеней свободы.

Степень согласованности мнений опрошенных специалистов устанавливают с помощью  $\chi^2$  — критерия, для чего находят расчетное значение  $\chi^2_{\text{расч}}$ :

$$\chi^2_{\text{расч}} = m(n-1)W \geq \chi^2_{\text{табл}}.$$

Если неравенство выполняется, то имеет место согласие мнений специалистов.

Далее строят диаграмму рангов. По оси абсцисс откладывают объекты в порядке убывания суммы рангов, а по оси ординат сумму рангов  $\Delta_i$ . Наивысший ранг (первый) присваивают объекту, получившему наименьшую сумму рангов, и наоборот, объекту, получившему наибольшую сумму рангов, присваивают самый низкий ранг.

Основные этапы подготовки экспертизы:

четкое определение цели (если целей несколько, то берут цель более высокого уровня);

составление списка объектов для ранжирования;

формирование группы специалистов;

проведение специалистами ранжирования объектов;

оформление результатов опроса специалистов в виде матрицы рангов.

В качестве примера рассмотрим следующую задачу. Четырем специалистам было предложено проранжировать восемь критериев  $q_1 — q_8$  по степени их полезности. Первый специалист расположил критерии по степени их полезности в следующей последовательности  $q_5, q_6, q_7, q_3, q_2, q_1, q_4, q_8$ . В соответствии с этой последовательностью критерию присваивается ранг «1», критерию  $q_6$  — ранг «2» и т. д. Результаты опроса специалистов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Матрица рангов

Эксперты	Факторы							
	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$
1	6	5	4	7	1	2	3	8
2	7	8	6	4	2	1	3	5
3	4	5	8	7	1	3	2	6
4	6	8	7	5	1	2	4	3
$\sum_{j=1}^4 q_{ij}$	23	26	25	23	5	8	12	22
$\Delta_i$	5	8	7	5	-13	-10	-6	4
$\Delta_i^2$	25	64	49	25	169	100	36	16

После обработки матрицы рангов получили коэффициент конкордации  $W = 0,72$  и  $\chi^2_{расч} = 20,2$ , что больше  $\chi^2_{табл} = 14,1$ . Отсюда следует утверждение, что мнения специалистов согласуются между собой. Из анализа диаграммы рангов (рис. 24) следует, что наиболее полезными критериями являются  $q_5, q_6, q_7$ . Остальные критерии менее существенны и их можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

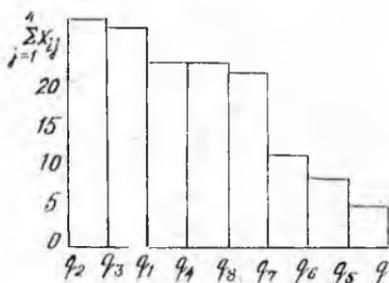


Рис. 24. Диаграмма рангов

### Задачи к разд. 3

3.1. Для технологического процесса ОМД назовите критерии, которые должен учесть инженер-технолог. Определите противоречивые критерии.

3.2. Необходимо спроектировать штамп для процесса горячей объемной штамповки. Перечислить критерии, с которыми приходится встречаться конструктору.

3.3. Ниже приведен перечень качеств, необходимых современному инженеру: компетентность ( $x_1$ ), умение принимать решения ( $x_2$ ), технические знания ( $x_3$ ), изобретательность ( $x_4$ ), коммуникабельность ( $x_5$ ), добросовестность ( $x_6$ ), умение четко выражать свои мысли ( $x_7$ ), умение проводить инженерный анализ ( $x_8$ ), любить свою Родину ( $x_9$ ), быть политически грамотным ( $x_{10}$ ), иметь марксистско-ленинское мировоззрение ( $x_{11}$ ). Провести ранжирование качеств по степени их влияния на формирование современного инженера.

3.4. При разработке нового полимерного материала оценивались следующие критерии:  $q_1$  — термостабильность, °C;  $q_2$  — морозостойкость, °C;  $q_3$  — предел прочности  $\sigma$ , кг/см;  $q_4$  — относительное удлинение  $\delta$ , %. Данные для восьми опытов приведены в табл. 9.

Таблица 9

Исходные данные				
Номер опыта	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$
1	272	-25	215	249
2	187	-23	179	204
3	162	-24	216	220
4	461	-26	198	201
5	267	-21	208	218
6	250	-27	220	264
7	489	-25	201	149
8	380	-23	230	126

Используя обобщенную функцию желательности  $D$ , определить наилучшие опыты.

3.5. Используя метод экспертных оценок (табл. 10), выделить существенные факторы

Таблица 10

Результаты анкетирования

Эксперт	Объекты													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	3	5	6	9	12	10	11	5	7	13	8	2	1	4
2	2	9	8	14	12	11	6	7	5	10	3	13	1	4
3	1	2	6	3	13	4	11	9	7	12	3	5	8	10
4	1	8	7	10	12	4	14	11	6	13	3	5	1	9
5	1	6	8	11	10	3	14	9	4	13	2	7	5	12
6	1	2	2	1	10	2	14	10	10	14	10	14	10	10

3.6. Провести выбор эффективных технологических процессов по трем критериям  $E_1 \rightarrow \max$ ,  $E_2 \rightarrow \max$ ,  $E_3 \rightarrow \min$  (табл. 11) и выбрать наиболее предпочтительный из них.

Таблица 11

Параметры технологических процессов

Комплексные критерии	Обозначение	Варианты технологического процесса										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Технический уровень	$E_1$	2,0	1,1	1,2	1,9	1,5	1,8	1,6	2,2	1,8	1,51	
Технический уровень тех. процесса	$E_2$	3,2	3,3	3,2	4,0	3,5	3,7	2,8	3,9	2,9	2,8	2,9
Затраты	$E_3$	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7	0,6	0,5	0,8	0,7	0,5	0,5

3.7. Требовалось получить чугун с пределом прочности  $q_1 > 25$ , жидкотекучестью  $q_2 > 750$ , горячеломкостью  $q_3 \leq 45$  и твердостью  $180 \leq q_4 \leq 250$ . Определить лучший сплав с помощью обобщенной функции желательности (табл. 12).

Таблица 12

Номер сплава	Исходные данные			
	Критерии			
	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$
1	14,4	455	55,5	295
2	35,0	160	63,0	310
3	29,4	450	52,5	295
4	12,0	900	35,0	235
5	30,0	540	33,5	277
6	23,6	840	15,0	212

3.8. Составить обобщенный показатель эффективности, если рациональная калибровка инструмента для прессования изделий должна обеспечивать: необходимый по размерам профиль в пределах допускаемых отклонений (допусков); максимальную производительность прессы; минимальный расход энергии; высокую стойкость деформирующего инструмента.

## 4. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ

### 4.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процесс оптимизации систем лежит в основе всей инженерной деятельности, поскольку классические функции инженера заключаются в том, чтобы, с одной стороны, проектиро-

вать более новые, эффективные и менее дорогостоящие технические системы, а с другой — разрабатывать методы повышения качества функционирования существующих систем [6, 7].

В соответствии с методологией системного анализа необходимо в процессе проектирования (совершенствования) выделить, по возможности, все альтернативы, связанные с выбором наилучшего проектного решения, и для каждой системы определить оптимальное решение (рис. 25). Методы оптимизации позволяют избежать полного перебора всех альтернатив и найти из этого множества наилучшие варианты.

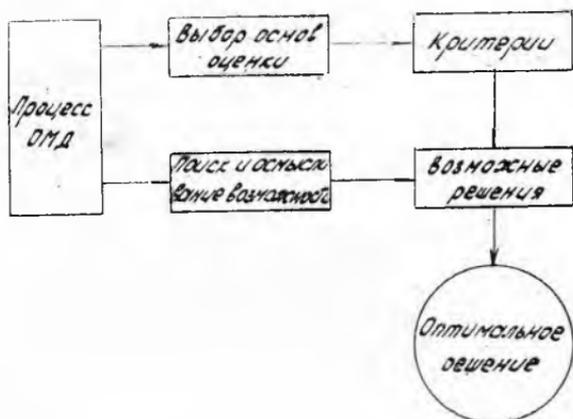


Рис. 25. Формальная схема оптимизации

Трем типичным ситуациям, которые имеют место при разработке систем и обладают иерархической соподчиненностью, соответствует три уровня оптимизации. Первый уровень состоит в выборе наилучшей руководящей технической идеи или принципа действия проектируемой технической системы; второй, называемый структурной оптимизацией, — в поиске наилучшей структуры или схемы в рамках выбранного принципа действия; третий, называемый параметрической оптимизацией — в определении наилучших значений параметров для выбранной структуры. Такая методология решения задач носит название *комплексного оптимизационного подхода*. Например, требуется изготовить  $\square$  — профиль. Возможные альтернативы на первом уровне: прессование, сортовая прокатка, гибка полосы в валках и т. п. Из анализа выясняется, что наиболее предпочтительным способом является прессование. Для реализации прессования возможны следующие структуры: прямое или обратное прессование, изотермическое или с градиентным нагревом и т. п.

После поиска наилучшей структуры переходят к параметрической оптимизации, например по усилию прессования  $P$ . В качестве управляемых параметров выберем угол конусности матрицы  $\alpha$  и скорость прессования  $v$ . Показателем, характеризующим качество пресс-изделия, будем считать, например, максимальное использование ресурса пластичности металла при деформировании.

Теперь задачу параметрической оптимизации можно сформулировать следующим образом: найти такие управляющие параметры  $\alpha$  и  $v$ , которые сообщают минимум критерию оптимизации

$$P(\alpha, v) = \min_{\alpha, v} P(\alpha, v)$$

при ограничении на исчерпание ресурса пластичности материала

$$\Psi = \max_{\alpha, v} \Psi(\alpha, v) < 1$$

и ограничениях, накладываемых на параметры, в виде неравенств

$$45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ,$$

$$0,1 \text{ м/мин} \leq v \leq 10 \text{ м/мин}.$$

В дальнейшем будем рассматривать системы, имеющие предпочтительную структуру и различающиеся численными значениями входных  $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  и выходных  $\bar{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  параметров.  $\bar{Y} = F(\bar{X})$  — целевая функция, а область ее определения  $\Omega$ ,  $\bar{X} \in \Omega$ . Аргументы этой функции — это управляемые параметры системы. На параметры накладывают ограничения вида  $x_i \geq 0$  или  $x_{\min i} \leq x_i \leq x_{\max i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Кроме пара-

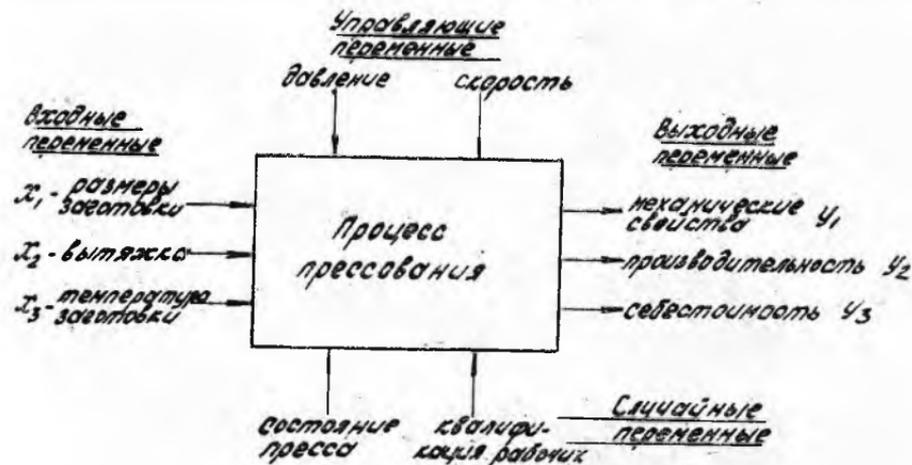


Рис. 26. Входные и выходные параметры системы прессования изделий

метрических ограничений часто присутствуют функциональные ограничения в виде  $\varphi_j(\bar{X}) \geq 0, j = \overline{1, m}$ , например, зависимость скорости прессования от температуры нагрева заготовки, скорости прессования и скорости истечения и т. п. При решении задач оптимизации необходимо найти  $x^* \in \Omega$ , образующие  $\min_{\bar{X} \in \Omega} F(\bar{X})$  или  $\max_{\bar{X} \in \Omega} F(\bar{X})$  (рис. 26).

$$\bar{X} \in \Omega \quad \bar{X} \in \Omega$$

Таким образом, решение задачи оптимизации сводится к поиску экстремума (максимума или минимума — в зависимости от смысла задачи) целевой функции  $\bar{Y} = F(\bar{X})$  вектора  $\bar{X}$  аргументов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , называемых *управляющими параметрами*.

## 4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Существующие в настоящее время методы оптимизации настолько многочисленны и разнообразны, что не поддаются строгой классификации. В настоящее время существующие методы оптимизации различают по следующим парам признаков: аналитические и поисковые (численные), направленного и ненаправленного поиска, детерминированные и случайные (вероятные) (рис. 27). При этом выделяют следующие классы методов поиска экстремума: линейное и нелинейное программирование, динамическое и квадратичное программирование. В свою очередь, в задачах нелинейного программирования используют условную или безусловную оптимизацию [18].

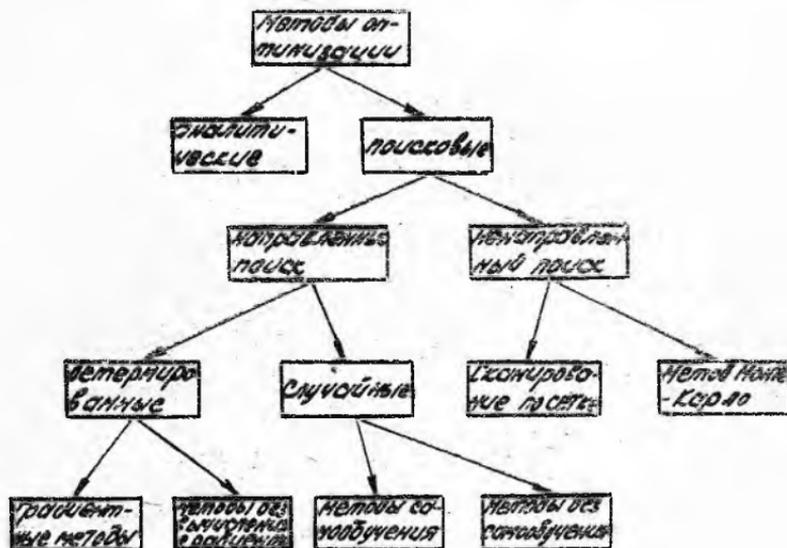


Рис. 27. Классификация методов оптимизации

Поиск оптимума не вызывает особых затруднений в тех случаях, когда целевая функция задана в аналитической форме. Тогда для определения оптимальных условий применяют аналитические методы. Координаты оптимума находят дифференцированием соответствующих уравнений, приравниванием частных производных нулю и решением полученной системы уравнений. К сожалению, ввиду сложности задач ОМД аналитические методы оптимизации используются очень редко. Для технологических процессов ОМД более характерными являются алгоритмические математические модели. В таких случаях чаще всего используют поисковую оптимизацию, при которой поиск цели — экстремальной точки в пространстве управляемых параметров — осуществляется последовательными шагами, ведущими от некоторой исходной точки  $\bar{X}_0$  через некоторые промежуточные отображающие точки  $\bar{X}_k$  в окрестность точки экстремума  $\bar{X}^*$ .

При направленном поиске используют рекуррентную зависимость

$$\bar{X}_{k+1} = \bar{X}_k + \Delta \bar{X}_k, \Delta \bar{X}_k = \xi_k t_k,$$

где  $t_k = |\bar{X}_{k+1} - \bar{X}_k|$  — длина шага;  $\xi_k$  — нормированный направляющий вектор, определяющий направление движения в пространстве параметров;  $\Delta \bar{X}_k$  — вектор приращений параметров на  $k$ -м этапе поиска;  $k$  — номер этапа поиска.

В методах детерминированного поиска компоненты вектора формируются по заранее установленным правилам (рис. 28). В методах случайного поиска на выбор компонент вектора  $\xi_k$  оказывает влияние элемент случайности.

В методах случайного поиска траектория случайного поиска не предопределена. В простейшем случае направление поиска  $\xi_k$  выбирается случайно, проверяется его перспективность, и при благоприятном результате проверки осуществляется шаг в этом направлении. При отрицательном результате проверки случайным образом выбирается новое направление и далее процесс повторяется.

Случайный выбор направления движения из точки  $\bar{X}_k$  выполняется с помощью алгоритмов выработки случайных чисел. Если выработать  $n$ -значений равномерно или неравномерно распределенной в интервале  $[-1, 1]$  случайной величины, то можно рассматривать эти значения как элементы  $n$ -мерного



Рис. 28. Схема вычислений при поисковой оптимизации

случайного вектора  $\bar{\xi}_k$ , задающего направление в  $n$ -мерном пространстве. Проверка перспективности направления выполняется путем расчета и сопоставления значений целевой функции  $F(\bar{X})$  в двух точках, одной из которых является точка  $\bar{X}_k$ , другой  $\bar{X}_{k+1}$ , находящаяся на выбранном направлении и отстоящая от  $\bar{X}_k$  на величину шага. При поиске минимума, если  $F(\bar{X}_{k+1}) < F(\bar{X}_k)$ , то новой отображающей точкой будет точка  $\bar{X}_{k+1}$ . Если попытка неудачна, то вновь возвращаемся к исходной точке  $\bar{X}_k$ . Поиск обычно прекращают, если выполнено подряд  $n$  неудачных попыток продвижения.

В тех случаях, когда целевая функция и ограничения линейны, при решении задач оптимизации используют линейное программирование. Методы линейного программирования позволяют существенно сократить объем вычислений путем направленного выбора вариантов с улучшенными значениями целевой функции на каждом шаге перебора. Если рассматривают задачу с целевой функцией в виде квадратичной формы и линейными ограничениями, то при решении задач оптимизации применяют квадратичное программирование.

При решении сложных задач оптимизации нередко оказывается целесообразным принимать решения не сразу, а постепенно, шаг за шагом, так что принятие решения разбивается на несколько этапов. Весьма эффективную реализацию такого подхода во многих задачах обеспечивает метод динамического программирования.

Направленный поиск сводится к полному или неполному перебору всех возможных вариантов сочетаний параметров с выбором наилучшего варианта. С помощью ненаправленного поиска находят все точки локальных экстремумов и среди них отбирают точку глобального экстремума.

Ненаправленный поиск проводят методами сканирования и Монте-Карло. В методе сканирования вся допустимая область пространства управляемых параметров разбивается на элементарные подобласти, и в каждой из них осуществляется подсчет целевой функции (рис. 29, а). Если ячейки достаточно малы, то получается общая картина поведения целевой функции с выявлением всех ее экстремумов. Применение метода Монте-Карло в экстремальных задачах сводится к последовательному анализу случайных точек параметрического пространства (рис. 29, б):

$$x_i = a_i(b_i - a_i)\xi_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad a_i \leq x_i \leq b_i,$$

где  $\xi_i$  — случайное число, полученное на ЭВМ с помощью генератора случайных чисел.

Широкое применение находят прямые методы поиска экст-

ремума, в которых для поиска точки экстремума используются только значения целевой функции. Различают методы одномерной и многомерной оптимизации. При одномерной оптимизации поиск экстремума проводится только в одном направлении; возможен пассивный и активный поиск.

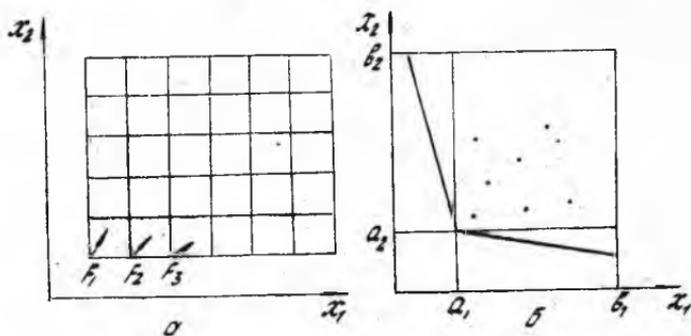


Рис. 29 Схемы вычислений по методу сканирования (а) и методу Монте-Карло (б)

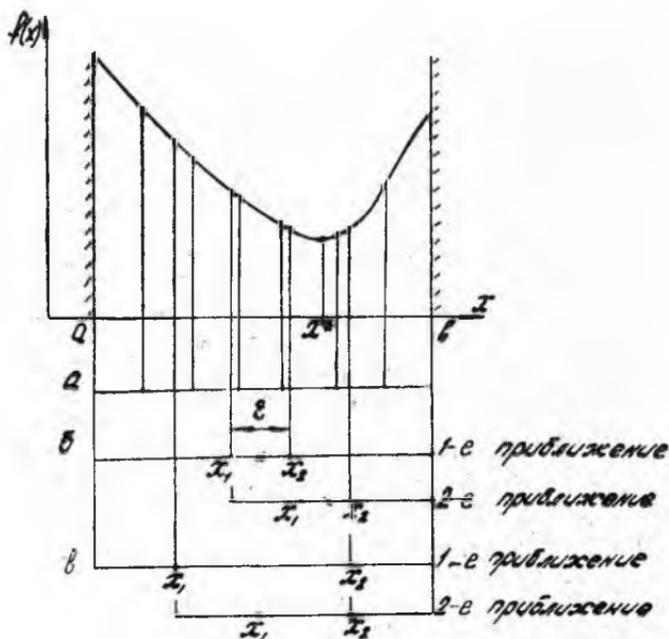


Рис. 30. Одномерные методы поиска: а — пассивный поиск; б — метод дихотомии; в — метод Фибоначчи

При пассивном поиске до проведения расчетов отрезок  $[a, b]$  разбивается на участки одинаковой длины (рис. 30, а)  $l_N = (b - a)/(N + 1)$ , где  $N$  — число расчетных точек. На каждом участке находят значение целевой функции. Методом перебора находят экстремальное значение. При активном поиске выбор очередных значений  $x$  на отрезке  $[a, b]$  зависит от результатов предшествующих опытов. Имеет место накопление и активное использование информации о свойствах целевой функции. Последовательное (пошаговое) проведение опытов более прогрессивно, так как позволяет экономить время и средства. Одними из наиболее простых являются методы дихотомии, Фибоначчи и золотого сечения. Идея методов этого класса заключается в том, что по двум значениям  $a \leq x_1 < x_2 \leq b$ , функций  $f(x_1)$ ,  $f(x_2)$  можно указать интервал, меньший первоначального, в котором заключена точка экстремума. Таким образом, задача сводится к наиболее удачному выбору промежуточных точек  $x_1$  и  $x_2$ .

При описании методов ориентировались на задачу отыскания точки минимума. Однако очевидно, что после замены целевой функции  $f(x)$  на  $-f(x)$  эти программы пригодны для отыскания точки максимума  $f(x)$ .

Метод дихотомии (половинного деления). Его идея заключается в следующем: относительно середины отрезка  $[a, b]$  симметрично размещают две точки  $x_1$  и  $x_2$  и находят для них значения целевых функций (рис. 30, б). Затем процедура повторяется, но уже на новом отрезке:

$$x_1 = (a + b) (1 - \varepsilon) / 0,5,$$

$$x_2 = (a + b) (1 + \varepsilon) / 0,5,$$

где  $\varepsilon$  — точность вычислений.

Вычисление проводится до достижения интервала неопределенности

$$l_N = (b - a)[2^{-N} + (1 - 2^{-N}) \varepsilon].$$

*Интервалом неопределенности* называют интервал длиной  $l_N$ , в котором находится точка экстремума функции.

Метод Фибоначчи. Этот метод наиболее эффективен, чем метод дихотомии. Применение его позволяет сократить число вычислений целевой функции при том же конечном интервале неопределенности. Реализация метода связана с использованием последовательности целых чисел, открытой итальянским математиком Леонардом из Пизы по прозвищу Фибоначчи (1202 г.). В предполагаемом способе берут две точки  $x_1$  и  $x_2$ , расположенные на равном расстоянии от концов отрезка  $a$  и  $b$  (рис. 30, в), исходя из ряда чисел Фибоначчи:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89

$$F_N = F_{N-1} + F_{N-2}, F_0 = F_1 = 1, N = 2, 3, \dots;$$

$$x_1 = a + (b - a) F_{N-2}/F_N,$$

$$x_2 = a + (b - a) F_{N-1}/F_N.$$

Координаты точек  $x_1$  и  $x_2$  находят следующим образом: каждая пара вычислений проводится в точках  $x_1$  и  $x_2$ , причем одно из чисел пары уже определено на предыдущем шаге. В результате  $N$  экспериментов интервал сокращается до величины

$$l_N = (b - a) \left[ \frac{1}{F_N} + \frac{F_{N-2}}{F_{N-1}} \varepsilon \right].$$

Чтобы при поиске этим методом получить требуемую точность, необходимо задать определенное число итераций. Запишем требуемый конечный интервал неопределенности в виде  $l_N = 2\Delta$ . Тогда для определения требуемого интервала неопределенности получим следующий алгоритм.

1. Находим, во сколько раз нужно сократить исходный интервал  $n = (b - a)/N$ .

2. Задаем наилучшее число Фибоначчи  $F_l$ , для которого выполняется условие  $N \leq F_l$ .

3. Исходный отрезок  $[a, b]$  делим в отношении  $F_{l-1}/F_{l-2}$ , и после этого поиск проводим в точках, симметричных относительно середины интервала неопределенности значений ( $l$  равно числу вычислений функции).

Метод золотого сечения. Он занимает промежуточное положение между методами дихотомии и Фибоначчи. Начальные условия для точек  $x_1$  и  $x_2$  берут следующими:

$$x_1 = a + (b - a) \tau^2, \tau^2 = 0,382,$$

$$x_2 = a + (b - a) \tau, \tau = 0,618.$$

Далее процедура расчета аналогична расчету по методу Фибоначчи до  $l_N = (b - a) \tau^{N-1}$ . На рис. 31 приведен алгоритм, реализующий методы Фибоначчи и золотого сечения.

К простым методам многомерного поиска экстремума относят метод Гаусса-Зейделя, метод градиента и метод наискорейшего спуска.

Метод Гаусса-Зейделя. В основе метода лежит идея так называемого покоординатного поиска (рис. 32, а). Направление очередного шага выбирается вдоль какой-либо координатной оси, например управляющего параметра  $x_1$ . Значения остальных параметров фиксированы. Движение вдоль координаты  $x_1$  производится в том направлении, в котором наблюдается уменьшение целевой функции  $\bar{Y} = F(\bar{X})$ , и до тех пор, пока  $F(\bar{X})$  уменьшается. Далее движение начинается вдоль новой координатной оси, например, параметра  $x_2$  и т. д. После цикла

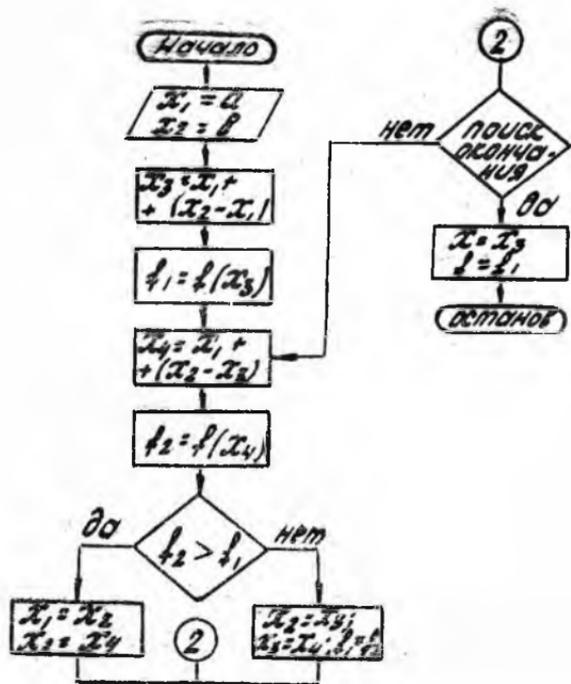


Рис. 31. Алгоритм поиска экстремума методами Фибоначчи и золотого сечения

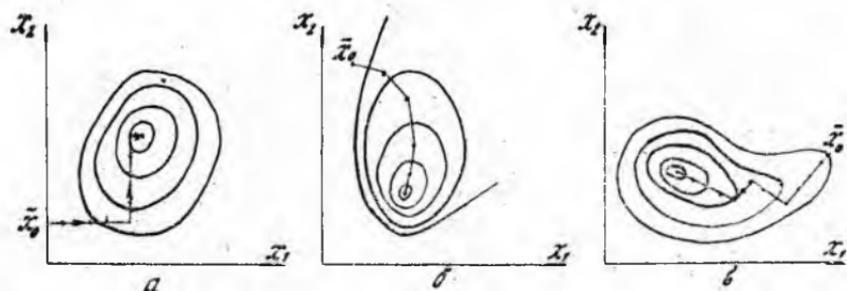


Рис. 32. Многомерные методы поиска экстремума: а — метод Гаусса-Зейделя; б — метод градиента; в — метод наискорейшего спуска

спусков вдоль всех  $n$  координатных осей производится новый цикл, если экстремум еще не найден. Когда ни по одной из осей невозможно перемещение с уменьшением функции  $F(\bar{X})$  с шагом  $t \geq t_{\min}$ , поиск прекращается, и полученная точка  $\bar{X}_k$  при-

знается за экстремальную точку  $X_k^*$ . Поиск вдоль координатных осей можно производить методами одномерной оптимизации, рассмотренными выше.

**Метод градиента.** В градиентном методе компоненты направляющего вектора определяются с помощью производных целевой функции  $\bar{Y} = F(\bar{X})$

$$\bar{\xi}_i = \frac{\frac{\partial F(\bar{X})}{\partial x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial F(\bar{X})/\partial x_i)^2}}$$

и совпадают с направлением наибоыстрейшего возрастания целевой функции. В соответствии с методом в каждой отображающей точке рассчитывается градиент целевой функции

$$\text{grad } F(\bar{X}) = (\partial F(\bar{X})/\partial x_1, \partial F(\bar{X})/\partial x_2, \dots, \partial F(\bar{X})/\partial x_n),$$

и при решении задачи поиска  $\min F(\bar{X})$  шаг осуществляется в антиградиентном направлении —  $\text{grad } F(\bar{X})$  в новую отображающую точку  $\bar{X}_{k+1}$  (рис. 32, б). Если  $F(\bar{X}_{k+1}) < F(\bar{X}_k)$ , то вычисляется  $\text{grad } F(\bar{X}_{k+1})$  уже в точке  $\bar{X}_{k+1}$  и делается новый шаг (рис. 32, б). Если  $F(\bar{X}_{k+1}) \geq F(\bar{X}_k)$ , то поиск продолжают с уменьшенным шагом. Если шаг уменьшен до некоторого заданного предела  $t_{\min}$ , но по-прежнему  $F(\bar{X}_{k+1}) \geq F(\bar{X}_k)$ , то точка  $X_k^*$  — экстремальная.

Разновидностью градиентного метода является метод наискорейшего спуска (рис. 32, в). Движение в направлении градиента проводится до тех пор, пока не перестанет убывать целевая функция  $F(\bar{X})$ . В достигнутой точке  $\bar{X}_{k+1}$  вычисляется новое направление градиента, и процесс повторяется в том же порядке. Для поиска экстремальной точки  $\bar{X}^*$  на каждом направлении применяют одномерный поиск.

### 4.3. МЕТОД КРУТОГО ВОСХОЖДЕНИЯ

При поиске оптимальных условий методом крутого восхождения достаточно использовать линейные модели

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k.$$

Необходимо найти входные переменные  $x_1^*$ ,  $x_2^*$ , ...,  $x_k^*$ , при которых целевая функция  $Y$  обращается в экстремум. Один из кратчайших путей нахождения — это движение в направлении градиента:

$$\text{grad } Y = (\partial Y/\partial x_1) \bar{i} + (\partial Y/\partial x_2) \bar{j} + \dots + (\partial Y/\partial x_k) \bar{m},$$

где  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ , ...,  $\bar{m}$  — единичные векторы в направлении координатных осей факторного пространства.

Из уравнения видно, что частная производная линейной

функции по каждой переменной  $x_i$  равна соответствующему коэффициенту  $b_i$ , т. е.  $\text{grad } Y = b_1 \bar{i} + b_2 \bar{j} + \dots + b_k \bar{m}$ .

Следовательно, для осуществления движения по градиенту значения переменных по каждой из осей  $\bar{i}, \bar{j}, \dots, \bar{m}$  необходимо изменять пропорционально величинам коэффициентов  $b_1, b_2, \dots, b_k$  с учетом их знака.

Бокс и Уилсон [24] предложили шаговой метод движения в направлении градиента, состоящий в следующем. На основе малой серии опытов находят локальное описание поверхности целевой функции в некоторой исходной области с помощью модели линейного вида. Далее определяют направление градиента. В этом направлении планируют мысленные опыты. Серия мысленных опытов рассчитывается последовательным прибавлением к основным уровням значимых входных переменных величин, пропорциональных величинам коэффициентов на соответствующие интервалы варьирования  $b_j \Delta x_j$  по каждой переменной. Потом находят базовую переменную, для которой произведение оказалось наибольшим по абсолютной величине и для нее вычисляют «единичный шаг»  $\Delta_6 = \mu x_6$ , где  $0 \leq \mu \leq 1$ . После этого рассчитывают «единичные шаги» для всех остальных переменных

$$\Delta_j / \Delta_6 = b_j \Delta x_j / b_6 \Delta x_6$$

и округляют расчетные значения. Полученные таким образом шаги последовательно прибавляют или вычитают (в зависимости от знака  $b_j$  и того, что ищут: максимум или минимум) к основному уровню каждой переменной. Для качественных переменных фиксируют лучший уровень. Незначимые переменные стабилизируют на любом уровне в интервале « $\pm 1$ ». Обычно рассчитывается 5—10 мысленных опытов. Реализацию численных опытов начинают с опыта, условия которого выходят из области эксперимента хотя бы одной из переменных. Из серии рекомендуется проводить 2—3 опыта. По оценке их результатов принимают решения о прекращении или дальнейшем проведении экспериментов.

Если одного линейного приближения недостаточно, то ставится новая серия опытов с центром в точке, которая соответствует наибольшему значению  $Y$ , и находится новое направление для движения по поверхности отклика. Такой шаговый процесс продолжается до достижения экстремума.

### Пример

#### Расчет параметров игл для прессования труб с внешним оребрением

В последние годы для теплообменных и холодильных аппаратов требуются трубы с продольным внешним оребрением. Одним из экономически

целесообразных методов изготовления таких труб является прессование. Однако при прессовании ребристых изделий возникают дефекты: гофры, коробление, невыполнение формы трубы и т. д.—поэтому иглу необходимо сконструировать так, чтобы исключить указанные дефекты.

При прессовании труб с внешним оребрением применяют многоканальные матрицы, у которых совокупность каналов, расположенных на зеркале, можно рассматривать как трубы с внешним оребрением (рис. 33). При пресс-

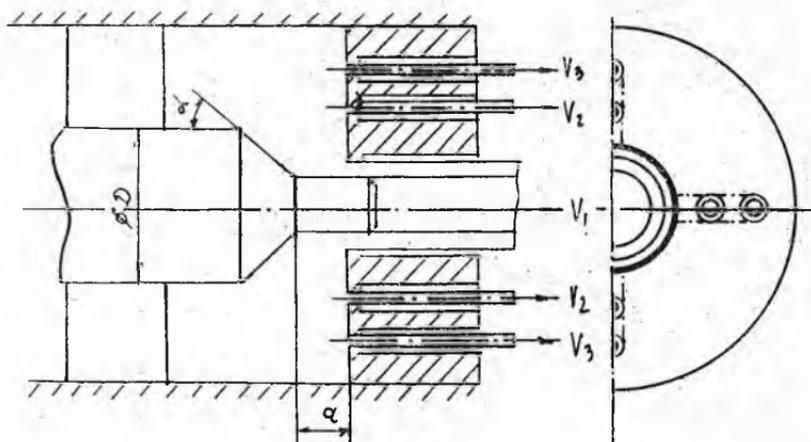


Рис. 33. Схема прессования труб с наружным продольным оребрением

совании в многоканальные матрицы происходит разделение металла в очаге деформации на отдельные потоки по соответствующим каналам. Объемы этих потоков по существу и определяют скорости истечения отдельных «ниток», длина которых в общем случае неодинакова и зависит от параметров иглы, смещения элементов и т. д.

Измерив длину участков  $l_k$  на любой стадии процесса, скорость истечения  $v_k$  элемента  $k$  определяли как

$$\frac{v_k}{v_{\text{ср}}} = \frac{l_k \sum_{k=1}^N \Phi_k}{\sum_{k=1}^N \Phi_k l_k}$$

где  $v_{\text{ср}}$  — средняя скорость истечения,

$$v_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=1}^N \Phi_k l_k}{\sum_{k=1}^N \Phi_k}$$

$\Phi_k$  — площадь  $k$ -го канала;

$N$  — число элементов, на которые разделен канал трубы.

При скоростях истечения ребра и трубы, отличных друг от друга, возможно появление гофров на трубе и на ребрах, а также больших остаточных напряжений, которые ухудшают механические свойства прессуемых изделий, а иногда приводят к короблению или разрушению трубы.

Для выдавливания скоростей истечения целесообразно использовать конически-ступенчатые иглы. Для расчета оптимальных параметров иглы использовали условие минимизации дисперсии скоростей истечения в элементы

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(1 - \frac{v_k}{v_{cp}}\right)^2}$$

Опыты проводили по плану полного факторного эксперимента  $2^3$ . Были взяты следующие входные переменные (см. рис. 30):  $x_1$  — диаметр иглы  $D$ ,  $x_2$  — конусность иглы  $\alpha$ ,  $x_3$  — положение иглы относительно матрицы  $a$ . Целевой функцией служила  $U$ . Интервалы варьирования входных переменных (табл. 13) приняты следующими:  $x_1 = 15 \dots 25$  мм,  $x_2 = 30 \dots 60^\circ$ ,  $x_3 = 4 \dots 10$  мм.

Таблица 13

Условия проведения эксперимента и средние (по двум слиткам) значения  $U$

Номер опыта	$D$	$\alpha$	$a$	$U$
1	15	30	4	0,116
2	15	60	4	0,123
3	25	30	4	0,089
4	25	60	4	0,114
5	15	30	10	0,172
6	15	60	10	0,156
7	25	30	10	0,172
8	25	60	10	0,151

В результате статистической обработки экспериментальных данных адекватное уравнение получим в виде

$$U = 0,137 - 0,005 x_1 + 0,026 x_3 + 0,002 x_1 x_2 + 0,004 x_1 x_3 + 0,009 x_2 x_3 - 0,003 x_1 x_2 x_3,$$

где

$$x_1 = \frac{\bar{x}_1 - 20}{5}, \quad x_2 = \frac{\bar{x}_2 - 45}{15}, \quad x_3 = \frac{\bar{x}_3 - 7}{3}$$

Анализируя полученное уравнение, можно отметить, что неравномерность истечения уменьшается с уменьшением значения  $a$  и увеличением значения  $D$ . По сравнению с другими факторами положение иглы относительно матрицы вызывает наибольшее изменение скорости истечения. Приближая конус иглы к матрице, мы уменьшаем скорость истечения гладкой трубы и наоборот, удаляя, увеличиваем скорость истечения. Этим уравнением можно пользоваться в качестве интерполяционного для предсказания размеров иглы.

Осуществим поиск оптимальных размеров конически-ступенчатой иглы методом крутого восхождения. Для этого незначимый фактор — угол конуса иглы стабилизируем на нижнем уровне  $-30^\circ$ . В движении по градиенту этот фактор участвовать не будет (табл. 14). В качестве единичного шага выбрано изменение на 1 мм положения иглы относительно матрицы. Далее с учетом интервала варьирования определяем значения шага для фактора  $x_1$  и ведем расчет серии «мысленных» опытов.

Расчет серии «мысленных» опытов

Уровни	Факторы			Примечание
	$D$	$\alpha$	$a$	
Верхний «+1»	25	60	10	
Нижний «-1»	15	30	4	
Основной «0»	20	45	7	
Интервал варьирования	5	15	3	
$b_j$	0,005	0,0	0,026	
$b_j \Delta x_j$	0,025	0,0	0,078	
Шаг $\Delta_j$	0,5	0,0	1,0	
Номер мысленного опыта				
1	20,5	30	6	
2	21,0	30	5	
3	21,5	30	4	
4	22,0	30	3	0,016
5	22,5	30	2	0,028
6	23,0	30	1	

Были реализованы опыты 4 и 5. Оказалось, что крутое восхождение по градиенту привело к уменьшению неравномерности истечения. Оптимальные параметры иглы  $D = 22$  мм,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $a = 3$  мм получены по условиям опыта 4.

#### 4.4. СИМПЛЕКС-МЕТОД

*Симплекс* — это простейший выпуклый многогранник, образованный  $k + 1$  вершинами общего положения в  $k$ -мерном пространстве. Например, на плоскости симплекс образует три любые точки, не лежащие на одной прямой, т. е. любой треугольник является симплексом. В трехмерном пространстве симплекс образует четыре точки, не лежащие в одной плоскости, т. е. любая треугольная пирамида также симплекс. Симплекс называется правильным, если все расстояния между вершинами равны.

Из любого симплекса можно, отбросив одну из вершин и используя оставшуюся грань, получить новый симплекс, добавив всего лишь одну точку. Путем последовательного отбрасывания одной из вершин можно осуществлять перемещение симплекса в  $k$ -мерном пространстве в направлении экстремума.

Если провести расчеты целевой функции в вершинах симплекса, то направление градиента будет проходить из центра через грань, противоположную вершине с минимальным значе-

нием  $Y$ . Вершина  $Y_{\min}$  заменяется на новую вершину  $Y_{\text{нов}}$ . Для продвижения к экстремуму от исходного симплекса переходят к симплексу, находящемуся в области более высокого значения градиента, путем отбрасывания вершины  $Y_{\min}$  и построения нового симплекса (рис. 34). Затем процесс повторяется, в результате чего формируется цепочка симплексов, перемещающихся к экстремуму. Достигнув области экстремума, симплекс начинает вращаться вокруг вершины с максимальным значением  $Y_{\max}$ . Это явление используется для определения конца процесса оптимизации.

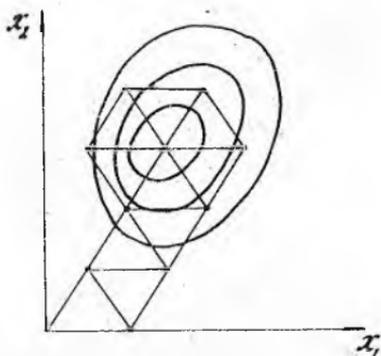


Рис. 34. Оптимизация симплексным методом

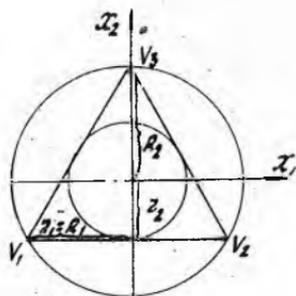


Рис. 35. Двухмерный симплекс

$k$ -мерный симплекс с центром в начале координат, ориентированный таким образом, что одна из его вершин лежит на оси  $x_k$ , а остальные вершины располагаются симметрично относительно координатных осей, можно представить следующей матрицей:

$$\bar{X} = \begin{vmatrix} r_1 & r_2 & r_i & r_{k-1} & r_k \\ -R_1 & r_2 & r_i & r_{k-1} & r_k \\ 0 & -R_2 & r_i & r_{k-1} & r_k \\ 0 & 0 & -R_i & r_{k-1} & r_k \\ 0 & 0 & 0 & -R_{k-1} & r_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_k \end{vmatrix},$$

где  $r_i$  и  $R_i$  соответственно радиусы вписанной и описанной гиперсфер для  $k$ -мерного симплекса. При длине ребра  $k$ -мерного симплекса, равного «1», радиусы гиперсфер, т. е. координаты вершин симплекса равны:

$$R_i = \sqrt{\frac{i}{2(i+1)}},$$

$$r_i = \frac{1}{\sqrt{2i(i+1)}}$$

где  $i = 1, 2, \dots, k$ . Число опытов в симплексной матрице равно числу вершин симплекса. На рис. 35 представлен начальный правильный симплекс при  $k = 2$ , в табл. 15 — матрица начального правильного симплекса, в которой указаны координаты точек, соответствующих вершинам исходного симплекса любой размерности.

Таблица 15

Координаты вершин симплекса

Номер вершин симплекса	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_k$
1	-0,5	-0,289	-0,204	-0,158	-0,129	$-r_k$
2	0,5	-0,289	-0,204	-0,158	-0,129	$-r_k$
3	0	0,578	-0,204	-0,158	-0,129	$-r_k$
4	0	0	0,612	-0,158	-0,129	$-r_k$
5	0	0	0	0,632	-0,129	$-r_k$
$k+1$	0	0	0	0	0	$R_k$

После реализации расчетов в вершинах начального симплекса строят новый симплекс с новой вершиной, полученной путем зеркального отображения отброшенной вершины, имеющей наихудший результат. Координаты новой вершины в кодовых значениях определяют по формуле

$$x'_i = 2/k [x_1 + x_2 + x_{p-1} + x_{p+1} + \dots + x_{k+1}] - x_p,$$

где  $x_p$  — координата отбрасываемой вершины. После проведения расчета в новой вершине получают значение целевой функции  $Y_{\text{нов}}$ . Затем рассматривают его совместно со значением параметров в вершинах нового симплекса, снова отбрасывают вершину с наихудшими значениями  $Y$  и аналогично строят новую вершину и т. д.

#### Задачи к разд. 4

4.1. Реализуйте процедуру одномерного поиска точки оптимума функции

$$f(x) = 3x^2 + (12/x^3) - 5$$

в интервале  $0,5 \leq x \leq 5/2$ , используя: а) метод золотого сечения, б) метод дихотомии, в) метод Фибоначчи. В каждом случае

Проведите по четыре вычисления значений функции. Сравните результирующие интервалы поиска, полученные с помощью перечисленных выше методов.

4.2. Требуется выбрать заготовку для прессования объемом  $V$  при наименьшей поверхности трения.

4.3. В табл. 16 представлены некоторые результаты полного факторного эксперимента  $N = 2^3$ .

Таблица 16

Исходные данные

Факторы	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Основной уровень $x_j$	0,40	40	60
Интервал варьирования $\Delta x_j$	0,15	100	10
$b_j$	20	11,9	-5,3

Для оптимизации процесса методом крутого восхождения выбрать единичные шаги и рассчитать серию «мысленных» опытов в направлении градиента.

4.4. Найти точку экстремума (максимум) функции

$$Y = \begin{cases} e^{3x/2} & 0,0 \leq x \leq 0,45 \\ 3 - 2,3x & 0,45 < x \leq 0,7 \\ 1 - x^2 & 0,7 < x \leq 1 \end{cases}$$

методом дихотомии при  $\epsilon = 0,04$  и  $N = 8$ .

4.5. Остаточные сжимающие напряжения после калибровки изделий в процессе волочения описываются следующим законом:

$$\sigma = 8,0 + 26,8x_1 + 3,1x_2 + 1,8x_2^2 + 2,8x_1x_2.$$

Используя симплекс-метод, найти оптимальные значения параметров  $x_1$  и  $x_2$ , обеспечивающие максимум.

4.6. Пользуясь любым из методов одномерного поиска, минимизируйте следующие функции с точностью до одного знака после запятой:

а)  $f(x) = 3x^4 + (x - 1)^2$ ,  $[0,4]$ ;

б)  $f(x) = 4x \sin x$ ,  $[0, \pi]$ ;

в)  $f(x) = 2(x - 3)^2 + e^{0,5x^2}$ ,  $[0,100]$ .

## 5. СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОМД

### 5.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Инженерная деятельность человека в настоящее время связана прежде всего с разработкой сложных технических объектов, т. е. с их проектированием. *Проектирование* — это комплекс работ по изысканиям, исследованиям, расчетам и конструированию, имеющих целью получение всей необходимой документации для создания новых изделий, оборудования или реализации новых технологических процессов ОМД, удовлетворяющих заданным требованиям.

Системный, комплексный подход к проектированию сложных систем, современных технологических процессов ОМД — характерная черта современной науки. Практика показала, что самые высокие темпы научно-технического прогресса, быстрый рост технического уровня металлопродукции обеспечиваются тогда, когда в единую систему объединены научные исследования, технологические разработки, конструкторская работа и производственный процесс [18—21].

Основные этапы создания систем следующие [16]:  
появление идеи создания системы, ее назначение;  
выработка технического задания на систему;  
проектирование системы (определение структуры и алгоритма ее функционирования);  
конструирование опытного образца (при необходимости);  
изготовление и испытание;  
эксплуатация системы.

Проектирование (совершенствование) сложных технических систем начинается с выработки технического задания (ТЗ) на проектирование и включает в себя этапы предварительного, эскизного и технического проектирования.

*Предварительное проектирование* связано прежде всего с поиском принципиальных возможностей построения системы, исследованием новых принципов, структур, технических средств и т. п. Результатом предварительного проектирования является техническое предложение.

На этапе *эскизного проектирования* (этап опытно-конструкторских работ) производится детальная проработка возможности построения системы. Результатом эскизного проектирования является эскизный проект.

На этапе *технического проектирования* выполняется тщательная проработка всех схемных, конструкторских и технологических решений. Результатом технического проектирования является технический проект.

При серийном производстве металлоизделий в процесс проектирования входит изготовление опытной (пробной) партии, по результатам которой вносятся все необходимые изменения в проектную документацию разрабатываемой системы, поскольку на этом этапе получают много полезной информации для улучшения проекта.

Типичное ТЗ содержит следующие данные: конкретные числовые требования к выходным параметрам; конкретные числовые данные, характеризующие диапазоны изменения внешних параметров; словесное (качественное) описание ограничений, требований и условий, непосредственно не поддающихся количественной оценке. В качестве примера рассмотрим ТЗ на проектирование гидравлического пресса с активными силами трения. В нем приводят требования на такие выходные параметры, как полезная мощность, производительность. К внешним параметрам здесь относят размеры заготовки, давление рабочей жидкости, скорости перемещения пресс-штемпеля и контейнера, ограничения по размерам и массе и т. п. Если ТЗ задается на самом верхнем уровне, то ТЗ на всех остальных уровнях получается путем декомпозиции в процессе проектирования.

Проектирование обычно сводится к решению группы задач, относящихся либо к задачам синтеза, либо к задачам анализа. *Анализ технических систем* — это изучение их свойства. При анализе не создаются новые объекты, а исследуются заданные. *Синтез технических систем* нацелен на создание новых вариантов, а анализ используется для оценки этих вариантов, т. е. синтез и анализ находятся при проектировании в диалектическом единстве (рис. 36).

В любой системе имеются входные и выходные параметры. Пусть  $\bar{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  — вектор выходных параметров системы,  $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  — вектор входных параметров системы, тогда  $\bar{Y} = F(\bar{X})$ . Вид этой функциональной зависимости определяется структурой системы. Если на некотором уровне влияние внутренних параметров на функционирование объекта не учитывается, то варианты объекта — это варианты структуры. Такие объекты являются дискретными, например, технологический процесс механической обработки детали при разработке маршрутов: точение, фрезерование, шлифование. Если на данном уровне рассмотрения учитываются реальные значения внутренних параметров, то рассматриваемый объект — непрерывный, например, система гидроуправления прессом, крыло самолета. Такое деление объектов на дискретные и непрерывные является целесообразным. Для дискретных объектов основная задача — синтез структуры или структурная оптимизация (перебор структур). Для непрерывных объектов основные результаты получа-

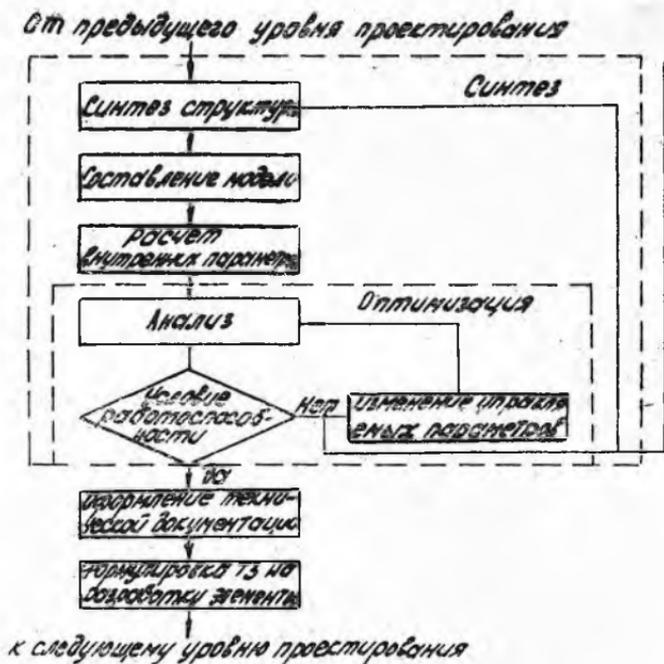


Рис. 36. Схема проектирования технологических процессов на очередном иерархическом уровне

ются при решении задачи методом параметрической оптимизации. В этом случае необходимо найти параметры  $\bar{X}^*$ , при которых целевая функция  $F(\bar{X})$  обращается в экстремум. Однако такое деление объектов условное. Так выбор маршрута механической обработки — дискретный объект, а расчет параметров — непрерывный объект.

Стратегия проектирования сводится к выбору оптимального сочетания различных этапов проектирования. Так линейную и адаптивную стратегию используют при проектировании наиболее простых систем, когда последующее действие зависит от исхода предыдущего (рис. 37, а, г). Циклическую стратегию применяют для оптимизации какого-либо параметра (рис. 37, б). Применение разветвленной стратегии позволяет привлечь большое число исполнителей, что сокращает время проектирования (рис. 37, в).

Наиболее ответственным этапом проектирования процессов ОМД является выбор предпочтительного процесса. Задача выбора встает при разработке новых технологических процессов, когда необходимо выбрать один (наилучший) вариант из не-

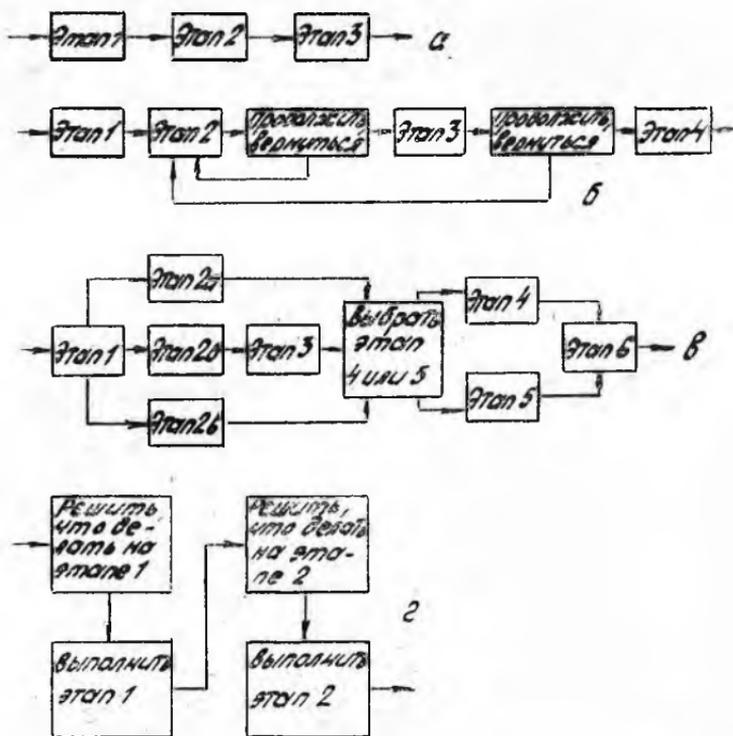


Рис. 37. Виды стратегий проектирования: а — линейная; б — циклическая; в — разветвленная; г — адаптивная

скольких возможных. При этом, для того чтобы выбор был наиболее обоснованным, должно быть рассмотрено как можно больше возможных вариантов.

Как большинство сложных систем, технологический процесс ОМД оценивается некоторым множеством критериев. Так потребительскими свойствами изделий являются: геометрическая точность, механические свойства металла, качество поверхности и др. На основании этих свойств определяется группа частных критериев, характеризующих технический уровень изделий. При реализации технологического процесса происходит потребление средств производства, материалов, энергии и живого труда, т. е. создаются стоимости. В связи с этим возникает потребность в оценке технологического процесса по таким критериям: как трудоемкость процесса, коэффициент использования металла, степень автоматизации, производительность, энергоемкость, стойкость оснастки и др., которые характеризуют технический уровень технологического процесса.

Схема системного проектирования технологических процессов ОМД состоит из следующих укрупненных этапов:  
 выбор переходов технологического процесса;  
 выбор необходимого оборудования;  
 проектирование деформирующего инструмента.

Рассмотрим в качестве примера методику системного проектирования деформирующего инструмента с помощью ЭВМ.

## 5.2. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА

Проектирование деформирующего инструмента является задачей, которая решается непосредственно по завершении процесса проектирования технологии, а в целом ряде случаев — параллельно с последним, так как параметры инструмента во многом определяют технологию, например количество технологических переходов, и т. д.

Выбор рациональной конструкции инструмента зависит как от качества изготовления, так и условий эксплуатации (табл. 17).

Таблица 17

Основные требования к инструменту

Основные требования к конструкции инструмента	Основные принципы конструирования, удовлетворяющие заданным требованиям
<i>Технические:</i> надежность и стойкость; точность изделий	Уменьшение рабочих нагрузок Снижение локальных напряжений Стабильность наладки Создание жесткой конструкции
<i>Социальные:</i> безопасность труда	Безопасность
<i>Экономические:</i> уменьшение габаритных размеров; снижение трудоемкости, стоимость изготовления и эксплуатации; повышение производительности	Компактность Технологичность Соответствие типу производства

Для выбора рациональной конструкции инструмента нужна математическая модель. Эту модель можно представить как стохастическое соотношение между вектором параметров оптимизации  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  и вектором критериев оптимизации  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ . При наличии заданных ограничений  $x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}$ .

Нужно по модели провести анализ и сделать выбор такого комплекса составляющих вектора  $X$ , при которых достигается максимум (минимум) целевой функции  $Y = F(X)$ . Множество значений вектора  $X$ , возможных по техническим условиям эк-

сплуатации, образуют область допустимых конструкций инструментов. Множество значений вектора  $\bar{Y}$  образуют пространство качества, которое в общем случае определяется тремя основными категориями требований: техническими, социальными, экономическими.

Таким образом, задача выбора рациональной конструкции инструмента является многокритериальной. Для ее решения в последние годы разработаны диалоговые системы проектирования с помощью ЭВМ. Цель диалоговой системы (рис. 38):

рассчитать все параметры конструкции деформирующего инструмента с помощью научно обоснованных методик и сложных формул, которые трудно применимы при неавтоматизированном проектировании;

просчитать за небольшой промежуток времени десятки, сотни различных вариантов;

повысить эффективность труда инженера.

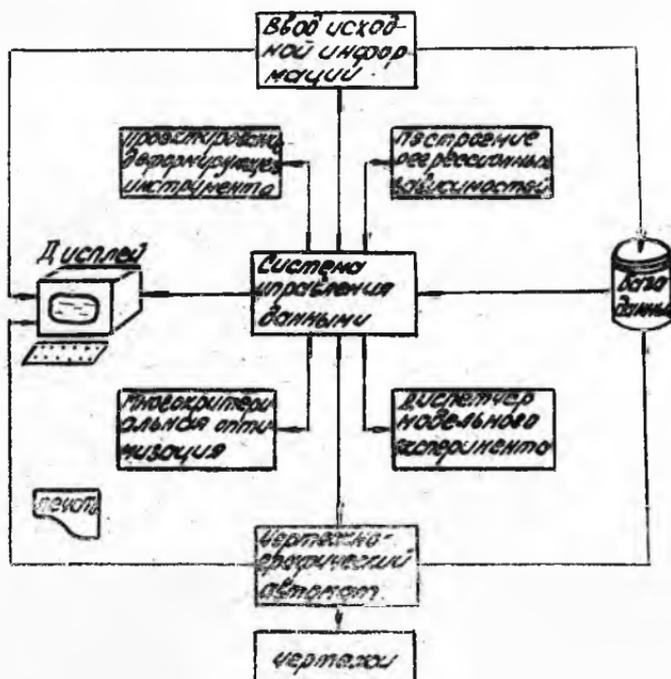


Рис. 38. Диалоговая система проектирования

Подсистема *многокритериальной оптимизации* позволяет значительно сократить объем экспериментов путем выбора оптимальных сочетаний варьируемых факторов.

Подсистема *диспетчер модального эксперимента* обеспечивает построение матриц планирования эксперимента, проведение серии модельных экспериментов.

В подсистеме *проектирование деформирующего инструмента* решаются три основные задачи, а именно:

расчет необходимых геометрических параметров рабочих поверхностей, на которых происходит непосредственный контакт с металлом;

проектирование исполнительных размеров инструмента в целом с привязкой к конкретному технологическому оборудованию; выбор марок сталей.

Вторая задача при автоматизированном проектировании заключается, как правило, в выборе определенного типа штампа, калибра и т. п. из унифицированного ряда, так как для типового оборудования применяется типовый инструмент. Например, при прессовании изделий исполнительные (габаритные)

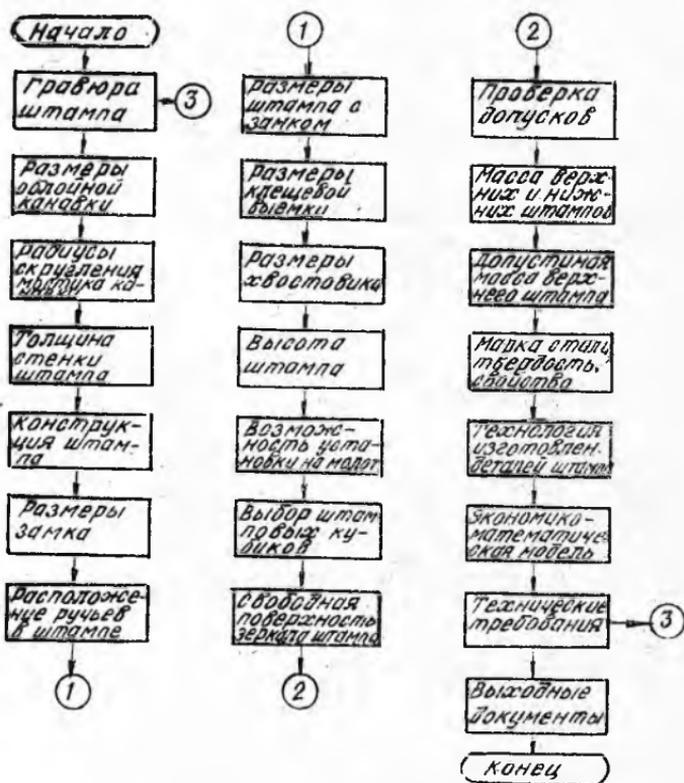


Рис. 39. Блок-схема алгоритма проектирования молотовых штампов

размеры матриц для каждого размера контейнера одни и те же. Различие лишь в форме и размерах канала.

Основные этапы автоматизированного проектирования:

выбор аналитических зависимостей, определяющих размеры деформирующих поверхностей инструмента с максимальным учетом свойств материала и технологических параметров процесса;

анализ процесса деформирования с назначением необходимых условий, ограничений и требований к инструменту, а также определение критериев оптимизации для решения задачи поиска рациональной конструкции инструмента;

анализ возможных способов изготовления инструмента и определение информации для станков с ЧПУ;

выбор формул для проведения необходимых прочностных расчетов;

выбор зависимостей для определения усилия деформирования, действующего на инструмент;

оценка предлагаемой эффективности расчета.

Алгоритм молотовых штампов, показанных на рис. 39 [21], построен по модульному принципу. Каждый модуль — это отдельный блок, в описании которого указывают входные параметры, алгоритм решения и выходные параметры.

### **5.3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОМД**

Система автоматизированного проектирования технологического процесса ОМД (САПР ТП) осуществляется по единой унифицированной схеме (рис. 40), включающей следующие блоки.

**Б л о к 1.** Формирование общих сведений по очередной операции технологического процесса, в т. ч. определение ее наименования (вида) и соответствующего кода, уточнение адреса выполнения (цех, участок, рабочее место), номера инструкции по охране труда или шифра конкретизирующего документа.

**Б л о к 2.** Конкретизация модели технологического оборудования по рассматриваемой операции.

**Б л о к 3.** Назначение технологического инструмента по данной операции.

**Б л о к 4.** Конкретизация вида и содержания очередного технологического перехода.

**Б л о к 5.** Логический анализ вида технологического перехода, назначенного в блоке 4. Если переход является основным (т. е. отражает процесс непосредственной обработки), то управ-

ление передается на блок 6, а если переход вспомогательный (т. е. связанный с установкой, переустановкой, снятием детали и т. п.), то управление передается на блок 9.

Блок 6. Назначение деформирующего мерительного и вспомогательного инструментов.

Блок 7. Конкретизация технологических параметров формоизменения по переходу, например: размера заготовки, длины рабочего хода инструмента, числа переходов и т. п.

Блок 8. Конкретизация режимов деформирования, например: степени деформации, скорости деформирования и т. п.

Блок 9. Уточнение нормы вспомогательного времени, связанного с переходом.

Блок 10. Логический анализ признака окончания операции. Если переходы исчерпаны, то осуществляется передача управления на блок 11, а если нет, то возврат на блок 4.

Блок 11. Уточнение характеристик операций, связанных с техническим нормированием, в т. ч. кода профессии исполнителя и разряда работы, признака норм времени и количества одновременно обрабатываемых деталей, численности исполнителей, норм подготовительно-заключительного времени и т. п.

Блок 12. Логический анализ признака завершения технологического процесса. Если перечень операций не исчерпан, то осуществляется возврат на блок 1, а если исчерпан, то завершается цикл технологического проектирования по очередной детали.

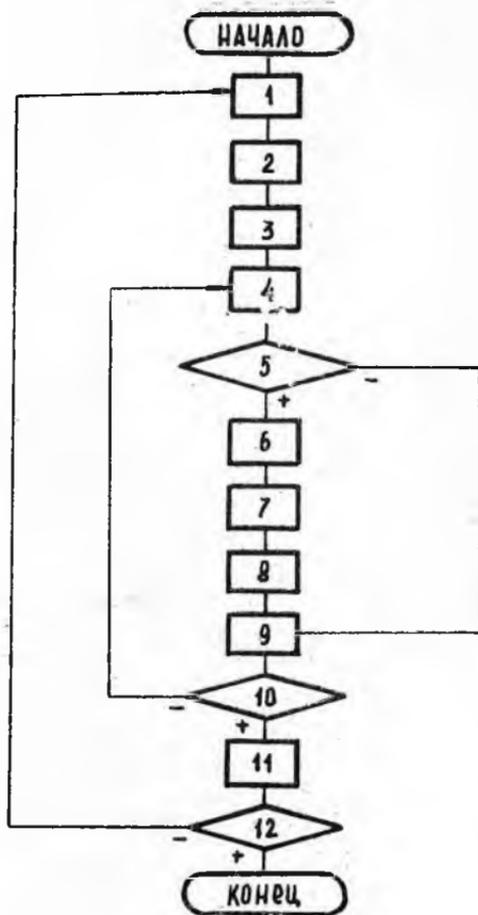


Рис. 40. Алгоритм проектирования технологического процесса ОМД

Рассмотренная схема определенным образом отражает установленный Государственными стандартами порядок заполнения технологических карт в условиях максимальной унификации форм используемой документации (ГОСТ 3.1118—82 и ГОСТ 3.1418—82) и с принципиальной точки зрения не зависит от классификационной принадлежности детали и вида обработки. Именно это обстоятельство объясняет правомерность использования такой схемы в комплексной САПР ТП.

На рис. 41 представлена для сравнения схема «ручного» проектирования технологического процесса ОМД, из которого следует, что при традиционном проектировании ядром системы яв-



Рис. 41. Схема процесса «ручного» проектирования технологического процесса ОМД

ляется проектировщик. Ядром автоматизированного проектирования становится алгоритм, записанный на языке, понятном машине. Основная функция проектирования заключается в переработке исходных данных и получении комплекта документов (чертежи, схемы, таблицы, ведомости и др.), описывающих технологический процесс ОМД.

#### 5.4. МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ АЛЬТЕРНАТИВ

При генерации альтернативных вариантов систем используются различные методы [2, 10, 23].

Метод мозгового штурма. Основные правила мозгового штурма:

1. В группу «генераторов» альтернатив должны входить инженеры различных специальностей.

2. Генерирование альтернатив ведут свободно, высказывая любые альтернативы, в том числе явно ошибочные, шуточные, фантастические. Регламент — минута. Альтернативы высказываются без доказательств. Все альтернативы записываются в протокол.

3. При генерировании альтернатив запрещена всякая критика. В ходе штурма между его участниками должны быть установлены свободные и доброжелательные отношения. Желательно, чтобы альтернатива, выдвинутая одним участником штурма, подхватывалась и развивалась другими. Чем больше альтернатив, тем лучше.

4. При экспертизе следует внимательно продумать все альтернативы, даже те, которые кажутся явно ошибочными или несерьезными.

Обычно группа генерации альтернатив состоит из шести—десяти человек. Продолжительность штурма 20—30 мин.

**Синектический метод.** Группа специалистов по методу мозгового штурма генерирует несколько идей, из которых затем выбирают наиболее прогрессивную и развивают ее до высших показателей.

**Ранговый метод.** Творческий процесс осуществляется как и при синектическом методе, но в группу, состоящую предпочтительно из четырех специалистов, включают соответственно выявленных с помощью тестов генератора идей, критика, информатора и организатора работы группы.

**Алгоритм решения изобретательских задач.** Поиск альтернатив осуществляется по программе, в структуру которой в виде операторов заложены законы развития технических систем. С помощью операторов изобретатель шаг за шагом выявляет физические противоречия и определяет ту часть технической системы, к которой они «привязаны». Затем используются операторы, изменяющие выделенную часть системы и устраняющие физические противоречия [2].

**Эмпатия.** Инженер ищет альтернативные решения поставленной задачи, представив себя проектируемой системой, обрабатываемым объектом и т. п.

**Аналогия.** Исследуются аналогичные системы, встречающиеся в других областях техники, в природе и т. п.

**Инверсия.** Широко используется при модернизации существующих технических систем. Новые альтернативы получают благодаря новому подходу к известной системе. Этот метод предполагает отказ от прежних взглядов на систему с тем, что-

бы посмотреть на нее с некоторой новой или измененной позиции.

Если некоторый объект обычно рассматривается снаружи, то применение метода инверсии означает, что теперь он будет исследован изнутри. Если в некотором устройстве некоторая деталь всегда располагалась вертикально, то инверсия означает, что ее переворачивают вверх дном, ставят в горизонтальное положение или помещают под некоторым углом. Если одна часть системы движется, а другая неподвижна, то инверсия означает, что эти части меняются местами. Перевернуть вверх дном, вывернуть наизнанку, поменять местами — эти слова характеризуют существо метода инверсии.

**Фантазия.** Анализируются альтернативы на основе не-реальных вещей или сверхъестественных процессов, например, отсутствие массы, трения, сопротивления и т. п.

**Функционально-критериальный анализ.** Разрабатывается функциональная схема проектируемого устройства, функции ранжированы по степени влияния на полезную отдачу устройства, определяются критерии, значения которых взаимосвязаны с решаемыми функциями. Анализируются предлагаемые механизмы реализации заданных функций в направлении достижения общей наиболее высокой компромиссной критериальной оценки.

**Метод фокальных объектов.** Сущность метода состоит в перенесении признаков случайно выбранных объектов на совершенствуемый объект, который лежит как бы в фокусе переноса. Метод применяют в следующем порядке:

1. Выбор фокального объекта (например часы).
2. Выбор трех — четырех случайных объектов (их берут наугад из словаря, каталога, технического журнала и т. д., например: кино, змея, касса, полюс).
3. Составление списков признаков случайных объектов (например, кино: широкоэкранный, звуковое, цветное, объемное и т. д.).
4. Генерирование идей путем присоединения к фокальному объекту признаков случайных объектов (например, широкоэкранные часы, звуковые часы, объемные часы и т. д.).
5. Развитие полученных сочетаний путем свободных ассоциаций (например, широкоэкранные часы: вместо узкого циферблата взять широкий. может быть узкий циферблат, который иногда растягивается в широкий и т. д.).
6. Оценка полученных идей и отбор полезных решений.

**Морфологический анализ.** Сущность метода состоит в разбиении (расчленении, декомпозиции) общей проблемы, объекта (системы, процесса, агрегата) на относительно не-

зависимые части, каждая из которых имеет несколько альтернативных решений. Варианты решений получают, взяв одно из возможных решений для каждой части. Общее число решений равно числу возможных комбинаций решений из каждой его части [17].

При практическом решении задачи в совершенствуемой системе выделяют несколько характерных признаков, свойств, характеристик, параметров, существенно влияющих на эффективность ее функционирования. Выделенные признаки характеризуют конструктивное исполнение элемента системы, принцип действия, рабочие характеристики, режим работы, материал детали и т. д. Каждому признаку и соответствию ставится перечень возможных его конкретных проявлений, исполнений. Так, принцип действия устройства может быть механический, электрический, гидравлический и др. Таким образом, каждый признак можно рассматривать как переменную, принимающую значения из некоторой заданной области.

Многообразие возможных решений выступает в виде наборов конкретных характеристик, которые находят с помощью морфологических матриц, графов и других способов. Морфологические матрицы могут быть построены для каждого иерархического уровня системы. Возможные уровни детализации системы удобно представлять в виде описательного дерева цепей. Морфологическая матрица упорядочивает все возможные варианты решений, представляя их в систематизированном виде и удобной для анализа форме. Она охватывает множество всех возможных комбинаций. Таким образом, все решения оказываются в поле зрения конструктора.

На рис. 42 представлена матрица, используемая для рационального выбора конструкции прессовой иглы и формы пазов под ребра. При проектировании игл следует выделить два характерных признака, существенно влияющих на эффективность прессования труб с внутренним спиральным оребрением. Это конструктивное исполнение иглы (цилиндрическая, коническоступенчатая или фасонная) и пазов (винтовой, шиповой с формующим пазом, шиповой с питателем). Для получения возможных конструкций игл и пазов целесообразно строить морфологические матрицы.

Для получения качественного винтового оребрения небольшой высоты и с углами подъема спирали ребер до  $30^\circ$  целесообразно применять цилиндрические иглы 1 с винтовыми пазами 1, (см. рис. 42), причем контур оребрения достаточно выполнить на относительно небольшом участке иглы. При прессовании труб с относительно высокими и тонкими ребрами с  $\psi < 30^\circ$  перед винтовыми пазами следует выполнять формующие пазы (2), обеспечивающие получение продольного оребрения, а также

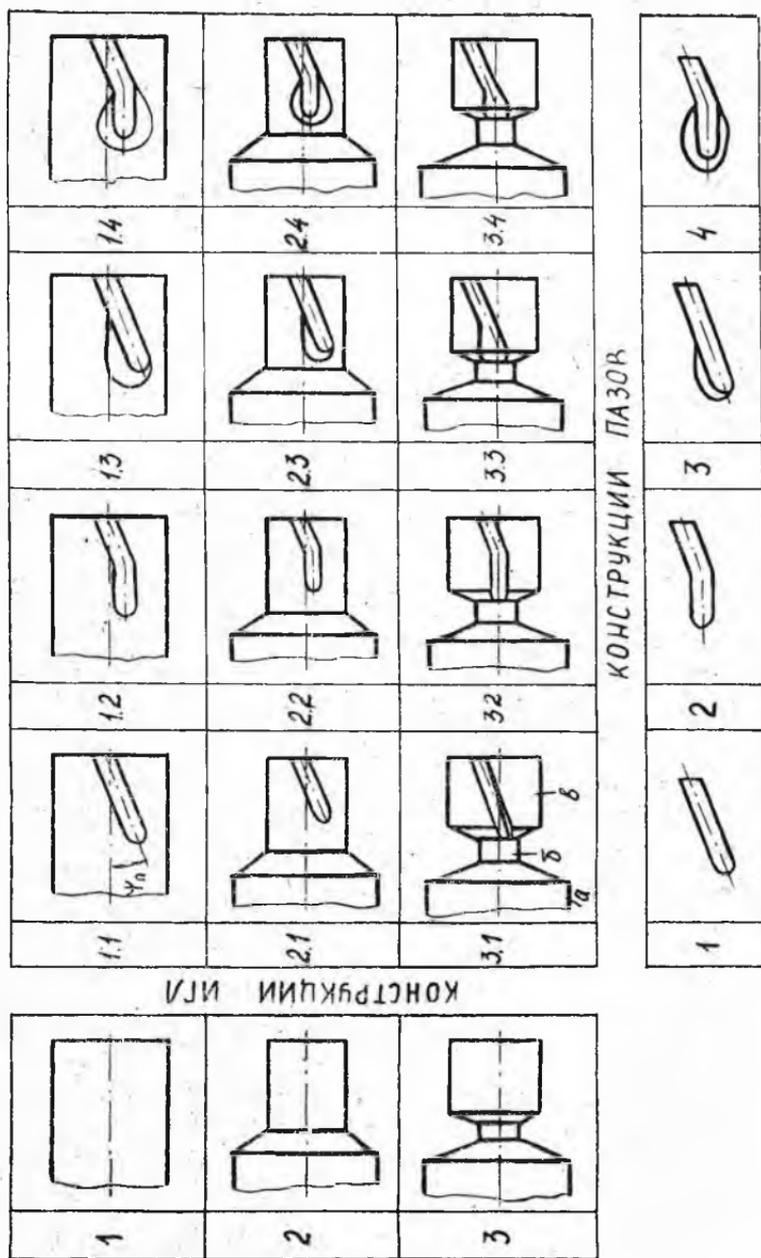


Рис. 42. Морфологическая матрица

питатели (3, 4), угол которых должен увеличиваться с уменьшением относительной толщины ребер. В винтовых пазах происходит переформирование продольного оребрения в винтовое. При прессовании труб с относительно малым наружным диаметром целесообразны коническо-ступенчатые иглы (3). С точки зрения технологичности изготовления винтовых пазов на игле и их заполняемости прессуемым металлом изготовления целесообразны конструкции фасонных игл (3). Использование таких игл позволяет прессовать трубы с часто расположенными по контуру внутренними винтовыми ребрами относительно большой высоты, так как выполняется пазов с питателями на цилиндрических иглах не представляется возможным ввиду малого расстояния между пазами. Прессование с фасонными иглами позволяет получать трубы с качественным винтовым оребрением по всей длине и периметру.

Систематическое изучение полученных решений может привести к новым техническим решениям, находящимся на стадии скрытой эволюции, которые могут быть не замечены (ненаблюдаемы) при традиционных методах проектирования. Размеры, качественное содержание, многообразие зависят от выбранного исходного множества отличительных признаков исследуемого объекта.

Полученное многообразие систематически исследуется. В процессе исследования исключаются варианты решений, не имеющие смысла и не удовлетворяющие условиям совместимости комбинируемых элементов системы (устройства). Это упрощает задачу при последующем более детальном анализе полученных решений и выборе рационального решения.

Выбор оптимального варианта решения связан с определенными трудностями, которые вызваны тем, что практически пока не существует какого-либо универсального метода оценки эффективности применения того или иного варианта решения. Эти трудности выражаются в проблеме выбора критерия оценки относительной важности технических решений, полученных методом морфологического анализа.

Исследование объекта методом морфологического анализа проводится в пять этапов: точная формулировка решаемой задачи, выявление основных характеристик (свойств, признаков) объекта, раскрытие возможных вариантов исполнения по каждой характеристике и построение морфологической матрицы, определение функциональной ценности каждого полученного решения и выбор рационального решения.

В процессе проектирования морфологический анализ может быть использован на этапах выбора элементной базы системы.

ее структуры, конструктивно-компоновочных решений и функциональной организации.

При выборе элементной базы системы решение выступает в виде набора функциональных элементов. Исходными данными являются при этом конечная совокупность  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  элементарных (частных) функций, возлагаемых на проектируемую систему. При выявлении совокупности частных функций удобно использовать описательное дерево целей.

Каждой частной функции  $f_i \in F$  соответствует конечное множество  $A_i$  реализующих ее элементов,  $i = 1, n$ ,  $|A_i| = m_i$  — число элементов множества  $A_i$ . Внутри множества  $A_i$  элементы функционально эквивалентны, т. е. взаимозаменяемы в системе. Являясь функционально эквивалентными, элементы могут отличаться принципом действия, конструктивным исполнением и т. д.

Многообразие наборов  $A$  базовых элементов в данном случае представляется в виде прямого произведения множества  $A_1, A_2, \dots, A_n$ :  $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n = \{ \langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle \mid a_i \in A_i, i = 1, n \}$ .

Каждый упорядоченный набор  $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$  является одним из возможных комплектов базовых элементов проектируемой системы. Общее число  $m$  всех возможных решений будет равно:  $m = m_1, m_2, \dots, m_n$ . Все решения из полученного многообразия неравноценны, и каждое из них по-своему оказывает влияние на достижение конечного проектного решения. Окончательный выбор решения осуществляется проектировщиком.

Морфологический анализ используется и при выборе структуры проектируемой системы. Для решения этой задачи необходимо располагать элементной базой будущей системы, описанием входов и выходов этих элементов и перечнем требований, предъявляемых к ее функциональной организации. Решение на функциональном уровне несет информацию о функциональной соподчиненности и иерархичности элементов системы. Однако оно не содержит сведений о пространственном (конструктивно-компоновочном) строении системы. Информация, заложенная в решении первого этапа (выбор элементной базы), содержится также и в решении второго этапа (выбор структур системы).

На этапе генерации многообразия конструктивно-компоновочных решений также рационально использовать морфологический анализ. Здесь каждое решение отражает морфологическую организацию системы — компоновку, объемно-пространственное строение, взаимное расположение частей (элементов), композицию, планировку. Решение на данном этапе не содержит полной информации о функциональной организации системы и тем более об ее оптимальном поведении. Конструктивно-компоновоч-

ное решение зависит от элементной базы и структуры проектируемой системы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксенов Л. Б., Мальчиков В. С., Рудаков М. Ю. Разработка технологических процессов точной горячей штамповки. Л., 1982. 40 с.
2. Альтшулер Г. С. Творчество как точная наука: теория решения изобретательских задач. М.: Сов. радио, 1979. 175 с.
3. Бабаев Ф. О. Оптимальный раскрой материала с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 1982. 168 с.
4. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с.
5. Блауберг И. В., Садовский В. Н., Юдич Э. Г. Системный подход: предпосылки, проблемы, трудности. М.: Наука, 1969. 273 с.
6. Вентцель Е. С. Исследование операций — задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 275 с.
7. Геминтерн В. И., Каган Б. М. Методы оптимального проектирования. М.: Энергия, 1980. 160 с.
8. Основы системного подхода / Б. А. Гладких, В. М. Аюханов, Ф. И. Перегудов и др. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1976. 244 с.
9. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
10. Дворянкин А. М., Половинкин А. И., Соболев А. И. Методы синтеза технических решений. М.: Наука, 1977. 103 с.
11. Джонс Дж. К. Методы проектирования: Пер. с англ. 2-е изд., доп. М.: Мир, 1986. 326 с.
12. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход: Пер. с польск. М.: Мир, 1981. 456 с.
13. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Проблемы системологии. М.: Сов. радио, 1976. 296 с.
14. Дьяченко Б. М. Системотехника в вузе. Ростов: Изд-во Рост. гос. ун-та, 1979. 160 с.
15. Железнов Ю. Д., Григорян Г. Г., Псел М. И. Системные основы интенсификации производства широкополосовой стали. М.: Металлургия, 1986. 152 с.
16. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа, 1980. 311 с.
17. Одрин В. М., Картавов С. С. Морфологический анализ систем. Киев. Наукова думка, 1977. 190 с.
18. Оптимизация прокатного производства / Полухин П. И., Скороходов А. И., Плюкович Б. М. и др. М.: Металлургия, 1983. 432 с.
19. Паршин В. С. Основы системного совершенствования процессов и станов холодного волочения. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1986. 192 с.
20. Прудковской Б. А. Зачем металлургу математические модели? М.: Наука, 1989. 192 с.
21. Тетерин Г. П., Полухин П. И. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки. М.: Машиностроение, 1979. 284 с.
22. Холл А. Д. Опыт методологии для системотехники: Пер. с англ./Под ред. Г. Н. Поварова. М.: Сов. радио, 1975. 448 с.
23. Хилл П. Наука и искусство проектирования: Пер. с англ./ Под ред. В. Ф. Венды. М.: Мир, 1973. 262 с.
24. Шаракшанэ А. С., Железнов И. Г., Ивницкий В. А. Сложные системы. М.: Высшая школа, 1977, 247 с.

---

---

Введение	3
1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПРИЕМЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА	5
1.1. Определение системы	5
1.2. Типы систем	9
1.3. Структурный анализ	10
1.4. Метод «дерева» целей	14
1.5. Этапы системного проектирования	17
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ	19
2.1. Основные положения	19
2.2. Статистические методы	21
2.3. Методы линейного программирования	31
2.4. Методы динамического программирования	33
2.5. Методы сетевого планирования	37
3. КРИТЕРИИ ВЫБОРА СИСТЕМ	41
3.1. Понятие критерия	41
3.2. Методы формирования обобщенных критериев	43
3.3. Методы экспертных оценок	47
4. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ	53
4.1. Постановка задачи	53
4.2. Классификация методов оптимизации	56
4.3. Метод крутого восхождения	63
4.4. Симплекс-метод	67
5. СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОМД	71
5.1. Основные положения	71
5.2. Автоматизированное проектирование инструмента	75
5.3. Система автоматизированного проектирования технологического процесса ОМД	78
5.4. Методы генерации альтернатив	80
Библиографический список	87

Каргин Владимир Родионович

ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОМД

Редактор Е. Д. Антонова

Техн. редактор Н. М. Каленюк

Корректор Н. С. Куприянова

Свод. тем. пл. № 606.

Сдано в набор 23.02.90 г. Подписано в печать 28.06.90 г.  
ЕО 00445. Формат 60 × 84 1/16. Бумага оберточная.  
Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. п. л. 5,1.  
Усл. кр.-отт. 5,2. Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 500 экз.  
Заказ 255. Цена 20 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королёва.  
443086, Куйбышев, Московское шоссе, 34.

---

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института.  
443001, Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.