

Ю. Л. ЧИГИРИНСКИЙ

Математические  
**Методы**  
управления  
процессами  
механической  
обработки

Министерство образования и науки РФ

Волгоградский государственный  
технический университет

**Ю. Л. Чигиринский**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССАМИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**



**Волгоград  
2010**

УДК 621.9.04 (035.3)

Рецензенты: ректор, зав. каф. «Технология машиностроения»  
Санкт-Петербургского института машиностроения  
д-р техн. наук, проф. Ю. М. Зубарев;

зав. каф. «КИМО» Саратовского государственного  
технического университета  
д-р техн. наук, проф. Б. М. Бржозовский;

ФГУП «Производственное объединение «БАРРИКАДЫ»,  
зам. гл. инженера, начальник отделения 274 А. А. Ермаков

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волгоградского  
государственного технического университета

Чигиринский, Ю. Л. Математические методы управления процессами механической обработки: монография / Ю. Л. Чигиринский. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. – 140 с.

ISBN 978-5-9948-0426-1

Ил. 63. Табл. 20. Библиогр.: 113 назв.

Рассмотрены проблемы алгоритмизации технологического проектирования и существующие методы их решения. Предложено использовать алгебраические структуры дискретной математики – графы, сети, множества – для повышения уровня формализованности задач технологического проектирования.

Издание может быть использовано в качестве учебного пособия для магистрантов и аспирантов и полезно для научных и технических работников машиностроительных предприятий.

ISBN 978-5-9948-0426-1

© Волгоградский государственный  
технический университет, 2010

© Ю. Л. Чигиринский, 2010

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА.....</b>	<b>8</b>
1.1. Основные понятия технологического проектирования.....	9
1.2. Методология создания сложных технологических систем.....	32
1.3. Проектирование технологии изготовления машиностроительной продукции.....	36
1.4. Повышение эффективности предпроизводственной подготовки в условиях применения САПР технологии.....	44
1.5. Алгебраические структуры дискретной математики.....	49
<b>Глава 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ПОЗИЦИЙ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....</b>	<b>72</b>
2.1. Оптимизационные задачи в технологическом проектировании.....	75
2.2. Содержательные постановки «сетевых» задач.....	76
2.3. Размерный анализ.....	91
<b>Глава 3. СОДЕРЖАТЕЛЬНЫЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....</b>	<b>98</b>
3.1. Обеспечение требований качества изделия.....	99
3.2. Обеспечение ритмичности производства.....	104
3.3. Организационно-техническое проектирование.....	105
3.4. Возможность комплексного решения задач технологической подготовки и технологического обеспечения производства.....	113
<b>Список использованной литературы.....</b>	<b>116</b>
<b>Приложение 1. Список сокращений.....</b>	<b>126</b>
<b>Приложение 2. Пример классификации типовых элементов детали.....</b>	<b>128</b>
<b>Приложение 3. Протокол решения задачи о минимальных затратах.....</b>	<b>129</b>
<b>Приложение 4. Протокол решения задачи коммивояжера.....</b>	<b>130</b>
<b>Приложение 5. Протокол решения задачи о максимальном потоке.....</b>	<b>133</b>
<b>Приложение 6. Точность размеров.....</b>	<b>134</b>
<b>Приложение 7. Отклонения формы.....</b>	<b>135</b>
<b>Приложение 8. Точность формы.....</b>	<b>136</b>
<b>Приложение 9. Шероховатость поверхности.....</b>	<b>137</b>
<b>Приложение 10. Волнистость поверхности.....</b>	<b>138</b>
<b>Приложение 11. Степень и глубина наклепа поверхностного слоя.....</b>	<b>139</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современное машиностроительное производство характеризуется резким ростом количественных и качественных показателей. С переходом от одного поколения технических объектов к другому производству усложняются сами однотипные процессы производства. В связи с новыми, придаваемыми продукции свойствами появляются неизвестные ранее процессы, которые зачастую не исключают, а дополняют существующие.

Такое положение носит объективный характер и вызывается тенденциями развития объектов производства, суть зачастую заключается в том, что продукция должна от поколения к поколению приобретать все новые, в основном дополнительные, свойства, повышающие ее потребительские качества. За последние десятилетия количество процессов производства резко увеличилось при одновременном повышении технического уровня и сложности самих технологических процессов.

Другой важный аспект сложного производства связан с тем, что рост количества процессов объективно ведет к росту количества «стыков» в производстве и к увеличению количества факторов, влияющих на качество продукции. Поэтому дальнейшее развитие объектов производства может привести к трудноразрешимым проблемам, в частности, экономическим, если при этом совершенствовать производство только традиционным путем. Решить эти проблемы среди других призвана общетехническая дисциплина – технология.

Анализ литературы о содержании деятельности современного инженера показывает, что в настоящее время, когда увеличение номенклатуры производства, усложнение конструкций и другие факторы привели к тому, что доминирующий ранее классический подход к решению инженерных задач, широко известный как метод проб и ошибок, уже не в состоянии обеспечить возросшие требования современного автоматизированного и механизированного производства. Сегодня процесс принятия инженерных решений превратился в процесс исследования, где

наряду с самой конструкцией изучается и анализируется целый ряд социально-экономических аспектов ее применения и эксплуатации.

В этой связи роль технологии [75, 102], ее вклад в научно-технический прогресс возрастают, что, в свою очередь, ведет к выработке новой методологии развития технологии, обладающей высокой эффективностью и ведущей к малооперационности производства, т. е. основанной на принципе совмещения.

Технический прогресс вызывает необходимость ускорения технической подготовки производства новых машин, что обеспечивается конструкторскими, организационными и технологическими мероприятиями. Технологические мероприятия направлены на сокращение сроков проектирования технологических процессов и внедрения их в производство. Один из возможных способов повышения эффективности технологического проектирования заключается в использовании, на всех этапах жизненного цикла, информационных технологий и, в частности, систем автоматизированного проектирования. Некоторые из разработанных в настоящее время САПР направлены на решение задач только конструкторского или только технологического проектирования. Результат проектирования в различных САПР также рассматривается неоднозначно. САПР, направленные на решение конструкторских задач предполагают в качестве результата проектирования генерацию рабочего чертежа детали или сборочного чертежа изделия в целом. Технологические системы воспринимают эту информацию только в качестве входной, результатом же работы данных САПР является производственный процесс, включающий разработку технологического процесса изготовления детали, подготовку технологической документации и другие элементы.

Стыковка этих двух классов систем является самостоятельной, достаточно сложной задачей, требующей тщательного анализа. Для решения поставленной задачи каждая поверхность детали в некоторый фиксированный момент времени рассматривается как объект, обладающий заданным набором свойств. К конструкторским свойствам поверхности относятся геометрическая форма и размеры. Технологическими свойствами являются: точность и качество обработанной поверх-

ности, погрешности взаимного расположения поверхностей и др. Геометрические характеристики изделия могут быть отражены на рабочем чертеже. Технологические характеристики помещаются в информационную систему, представляющую собой табличную базу данных с организованной системой доступа к данным.

С другой стороны, методы формообразования поверхностей можно рассматривать как элементы самостоятельного множества, каждый из которых сопровождается группой свойств, аналогичных технологическим свойствам поверхности: достижимые точность и качество обработки поверхностей и погрешности взаимного расположения.

Используя логические операции, например, пересечение множеств, можно определить методы формообразования, позволяющие получить требуемые свойства поверхности.

Рассматривая процесс обработки единичной поверхности от начала до конца как временной ряд, каждым из элементов которого является одно из фиксированных состояний поверхности, можно аналогичным образом получить множество методов формообразования, которые позволяют выполнить эту обработку с требуемым качеством.

Деталь в целом может рассматриваться как множество отдельных поверхностей. Таким образом, для построения всех возможных маршрутов обработки детали можно применить аналогичный подход. Далее задача сводится к выбору целостного решения, с одной стороны, и оптимального, с другой.

Целостность решения может проверяться, например, по возможности выполнения параллельной обработки некоторых поверхностей.

Одним из этапов проверки оптимальности решения является проверка соответствия парка оборудования, используемого в полученном маршруте обработки, имеющемуся на предприятии. После этого, из выбранных маршрутов определяется конечный маршрут, например, по экономическим соображениям, т. е. себестоимости изготовления детали в целом.

## **Глава 1. СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

Традиционно [22, 74, 82, 84] технология производства строится (проектируется) и реализуется в одной и той же последовательности: от формообразования к обработке, затем к сборке и испытаниям (или только к заключительной операции испытаний – контролю, т. е. без воздействия на изготовленный объект). При этом технологии часто разрознены и не увязаны между собой и конечной целью. Такой принцип построения технологии приводит к несоответствию свойств изготавливаемых изделий предъявляемым требованиям.

Существует и другой подход: наиболее целесообразное построение комплексного анализа должно быть направлено [6, 24, 57] от конечной стадии к начальной стадии производства, т. е. от требований, предъявляемых к технологии общей сборки, к требованиям процессов выполнения заготовок для деталей машин. При таком подходе скрыта угроза того, что качество новой продукции будет определяться уровнем существующего производства, поскольку в этом случае разрывается связь между свойствами продукции, которую надлежит изготовить, и возможностями производства.

Вследствие несовершенства первых двух подходов был разработан и реализован новый принцип построения технологии, названный [20, 38, 41, 96] принципом сквозной технологии. По данному принципу технологию предлагается создавать в зависимости от требуемых свойств изделия, «двигаясь» в обратном направлении. Это значит, что предусматриваемые разработчиком свойства изделия определяют количественные и качественные значения выявленных при испытаниях свойств, которые, в свою очередь, определяют требования к сборке, сборка – к предшествующим процессам обработки, а обработка – к процессам формообразования.

Таким образом, предложено задачу обеспечения выходных характеристик решать, подчинив все виды технологии требованиям, предъявляемым к создаваемым изделиям. Особенность сквозной технологии состоит в том, что она позволяет ре-



шить вопрос сопряжения всех звеньев производства в единый технологический процесс, имеющий одну и ту же конечную цель – требуемые свойства изделия.

Для обеспечения заданного в конструкторской документации (КД) выходного свойства продукции необходимо обеспечивать это свойство, начиная с материала и первых процессов изменения его форм. Хотя технология реализуется по традиционной схеме – от формообразования, строиться она должна по-новому – от испытаний. Для изготовления, например, продукции с требуемой геометрической точностью необходимо начинать обеспечивать это свойство с формообразующих процессов, предъявив ко всем предшествующим испытанию процессам такие технологические требования, чтобы обеспечить заданное в КД выходное свойство продукции.

Необходимо целостное понимание технологии как единой системы, обладающей общими признаками и, следовательно, общими закономерностями развития. Для реализации принципа сквозной технологии надо уже на ранних стадиях проектирования продукции иметь в виду всю совокупность технологических процессов. При этом отличительными новыми свойствами этой совокупности, являющимися результатом реализации принципа сквозной технологии, будут сопряженность процессов и одна и та же конечная цель.

Такой подход требует, чтобы каждый технологический процесс получил своевременное развитие и имел ко времени начала производства новой продукции необходимые качества, обеспечивающие заданные конструкторской документацией характеристики. Для обеспечения такого развития технологии должны базироваться на двух началах:

- закономерностях развития создаваемой продукции;
- внутренних закономерностях развития технологии (вида технологии).

### **1.1. Основные понятия технологического проектирования**

В этом разделе мы повторим основные понятия [5, 74, 82, 84] технологического проектирования, что позволит избежать неоднозначности в дальнейших рассуждениях.

### 1.1.1. Структура и способы организации производства

*Производственный процесс* – последовательность превращения предмета природы в изделие заданного качества.

*Объект производства* – любой предмет или набор предметов, подлежащих изготовлению на предприятии.

Иначе объект производства называют *изделием*. В соответствии с [25] установлено несколько видов изделий:

- *детали*, изготовленные из однородного по наименованию материала без применения сборочных операций;
- *сборочные единицы* – изделия, составные части которых соединяются в процессе изготовления;
- *комплексы* – несколько изделий, не соединяемых сборочными операциями в процессе изготовления, но предназначенные для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;
- *комплекты* – несколько изделий, не соединяемых сборочными операциями в процессе изготовления и последующей эксплуатации и имеющие общее назначение вспомогательного характера.

*Технологический процесс* – часть производственного процесса, во время которой изменяется качественное состояние объекта производства.

Следует учитывать, что изменение качественного состояния объекта производства выполняется не произвольным образом, а с целью достижения некоторого, наперед заданного, комплекса свойств.

Степень соответствия полученных свойств готового изделия заданным принято называть [5] *качеством*.

Как правило, производство изделий и, в частности, технологические процессы механической обработки и сборки проектируются таким образом, чтобы обеспечить заданное (но не максимально возможное) качество. Это связано с резким увеличением производственных затрат при повышении качества изделия. Исходя из этого определяют собственно предмет технологии машиностроения.

*Технология машиностроения* – отрасль [5, 54] науки, занимающаяся изучением закономерностей, действующих в процессе изготовления машин, с целью применения этих закономерностей для обеспечения требуемого качества продукции при наименьшей ее себестоимости.

Изменение качественного состояния касается химических и физических свойств материалов, формы, размеров, качества поверхности, внешнего вида и относительного расположения отдельных деталей в пространстве. Все виды механической обработки направлены на изменение, формы, размеров и качества поверхности заготовки или детали. Термическая обработка связана с изменением физических и химических (в случае химико-термической обработки) свойств материала изделия. Целью сборочного производства является изменение формы и взаимного расположения деталей. Кроме того, в технологический процесс включаются сопутствующие действия, такие как контроль состояния изделия на промежуточных стадиях, транспортирование заготовок и готовых изделий и т. д.

*Операция* – самостоятельная, завершенная часть [32, 34, 50, 86] технологического процесса, выполняемая, обычно, на одном рабочем месте или одним рабочим (одной бригадой рабочих при изготовлении или сборке крупногабаритных изделий).

Операция является основным элементом производственного планирования. Именно для отдельных операций разрабатывается документация в процессе подготовки производства.

*Переход* – самостоятельный составной элемент [32, 34, 51, 86] операции. Применительно к обработке резанием переходом принято считать законченный процесс получения каждой новой поверхности или сочетания поверхностей детали при обработке одним режущим инструментом.

Также к понятию «переход» относят действия, связанные с установкой, закреплением, раскреплением и снятием детали (заготовки); выполнением контрольных манипуляций (измерение размеров, оценка качества обработанной поверхности) и другие действия, без которых невозможно выполнение операции.

Структура технологического процесса, особенности выполнения обработки, применяемое оборудование и инструмент и приемы проектирования и подготовки производственного процесса зависят от масштабов [15, 108] производства.

*Масштаб выпуска* (годовая программа, программа производства) характеризует количество изделий, выпускаемых в единицу времени, в качестве которой обычно используют промежуток времени, равный одному календарному году.

*Партией изделий* (партией запуска, партией выпуска) называют количество изделий (деталей, заготовок), одновременно поступающих в производство для обработки на одном рабочем месте.

В зависимости от величины партии и масштаба выпуска различают три основных вида производства:

1. *Единичное* – изготовление уникальных изделий, опытных образцов и т. п. Предполагается однократный запуск в производство партии малого объема.
2. *Серийное* – периодическое изготовление изделий по неизменяемым чертежам в течение одного расчетного промежутка времени. Объем партии рассчитывается в долях от масштаба выпуска. Кратность годовой программы по отношению к размеру партии представляет собой количество периодов выпуска изделия:

- *мелкосерийное* производство характеризуется малыми размерами партии и частой сменой изделий в производстве. Принципы проектирования технологии и особенности применяемого оборудования и инструмента подобны единичному производству;

- *среднесерийное* производство;

- *крупносерийное* производство – номенклатура выпускаемой продукции включает несколько единиц несущественно отличающихся изделий. Период выпуска изделий сравним с длительностью расчетного промежутка времени. Размер партии достаточно большой. Особенности крупносерийного производства делают его похожим на массовое.

3. *Массовое* – изготовление продукции по неизменяемым чертежам в течение

всего расчетного промежутка времени. Массовое производство условно можно рассматривать как серийное, в котором размер партии равен годовой программе выпуска изделий.

Не следует считать, что серийность производства является характеристикой конкретного предприятия или производственного подразделения. Особенности современного производства и продукции таковы, что в пределах одного предприятия могут одновременно работать производства различных видов – например, в автотракторном машиностроении существует мелкосерийное производство кузовных деталей; среднесерийное производство силовых и крупносерийное – ходовых агрегатов машины. Наряду с этим производство, например, крепежных изделий является массовым. Серийность производства накладывает определенные ограничения на выбор

- принципов построения технологического процесса – концентрация или дифференциация обработки;
- методов получения и дальнейшей обработки заготовок;
- оборудования и инструмента для оснащения технологических процессов.

Оценка серийности может проводиться укрупненно [108] в зависимости от массы изделия и годовой программы выпуска или с учетом [43, 74, 109] трудоемкости обработки на каждой операции и величины годового фонда рабочего времени. Однако, следует признать, что оценка серийности является достаточно приближенной и, как правило, требует уточнения после завершения процесса проектирования.

#### 1.1.2. Механическая обработка

*Механическая обработка* изделий представляет собой часть производственного процесса, во время которой изменяются качественные характеристики изделия, то есть технологический процесс.

В нашей работе под механической обработкой мы подразумеваем обработку с удалением поверхностного слоя материала – обработку резанием. В данном разделе

ле необходимо сформулировать понятия, определяющие собственно процесс и характеристики процесса и результата обработки.

Система координат, в которой определяется положение детали при обработке, задается с помощью базовых поверхностей.

*Технологическая база* – совокупность точек, линий, поверхностей, определяющих положение детали относительно рабочих органов станка и режущего инструмента в процессе обработки.

Строго говоря, в теоретической механике устанавливается, что система координат однозначно задается сочетанием трех плоскостей. Однако в технологии машиностроения, в качестве базовых поверхностей кроме плоскостей могут использоваться также точки и прямые линии. В зависимости от вида базовой поверхности различают [26, 100] опорные, направляющие, двойные направляющие, установочные базы. В зависимости от назначения: базы технологические, конструкторские, измерительные. Совпадение или несовпадение различных назначений базовых поверхностей позволяет выделить основные и вспомогательные базы и т. д. Вопросам теории базирования посвящены работы Б. С. Балакшина [5], В. М. Кована [54, 55], В. С. Корсакова [58], А. П. Соколовского [97].

Выше было отмечено, что обработка любого изделия выполняется с целью достижения заранее определенных свойств. Обработка завершается тогда, когда свойства объекта производства становятся примерно такими, как задано. Понятие «примерно» определяется термином «качество изделия». Для контроля качества устанавливается ряд показателей, для каждого из которых должна быть определена количественная величина.

Система качественных показателей с установленными для них количественными оценками и допусками, описывающая служебное назначение изделия, называется *техническими условиями и нормами точности*.

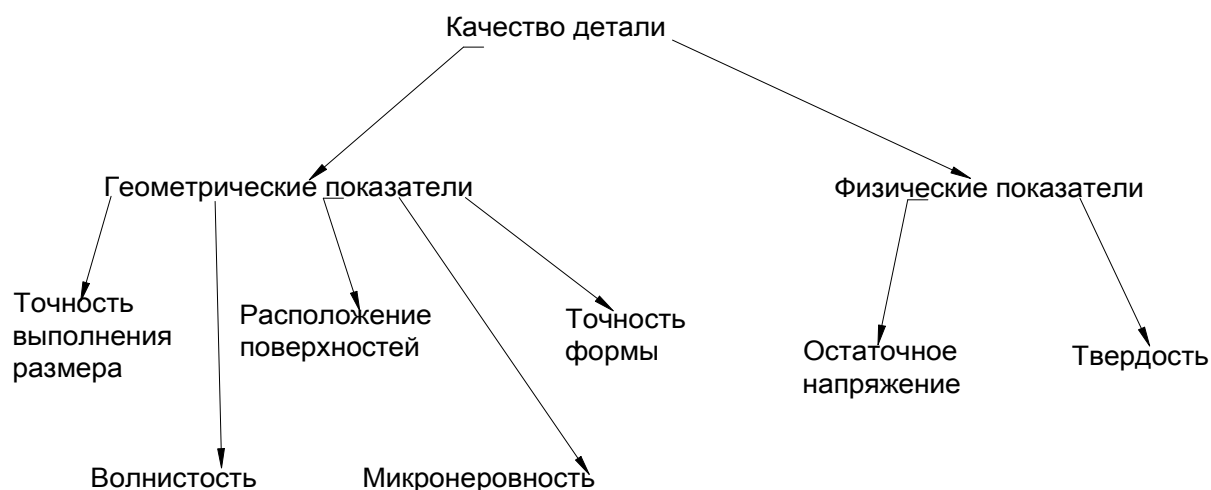
Следует учитывать, что получение абсолютно точных значений показателей качества является задачей невыполнимой, поэтому для любого количественного показателя устанавливается допуск.

**Допуском** называют наперед заданный диапазон значений, такой, что любое значение из этого диапазона считается равным некоторому номинальному значению.

Далее рассмотрим наиболее часто применяемые показатели качества изделий.

**Точность** – степень приближения детали к ее геометрическому прототипу.

Мерой точности служат отклонения от номинального значения – установленные нормами допустимые, во-первых; и измеренные, во-вторых. Достаточно часто, наряду с понятием «точность», используют обратное понятие «погрешность», т. е. собственно отклонение от номинального значения. Определяют [37, 59, 106] показатели точности размеров, точности геометрической формы каждой поверхности изделия и точности взаимного расположения поверхностей (рис. 1).

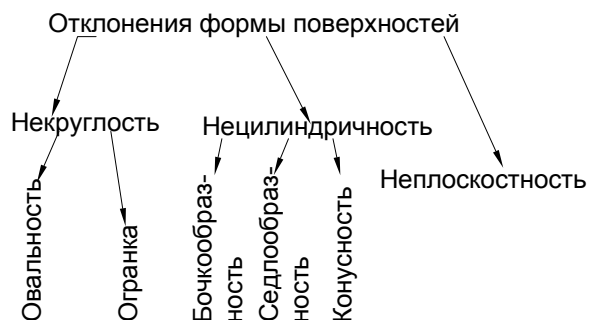


**Рис. 1. Показатели качества**

Точность размеров (прил. 6) устанавливается в соответствии с международным стандартом ISO 286-1:1988 «Допуски и посадки по системе ISO» и измеряется в квалитетах точности.

Точность формы поверхности может определяться отклонениями трех основных видов:

– макрогеометрические (рис. 2, прил. 7, 8) отклонения устанавливаются в пределах габаритных размеров поверхности – задают-



**Рис. 2. Отклонения формы**

ся видом отклонения (неплоскостность, нецилиндричность и т. д.) и допустимой максимальной величиной отклонения;

- волнистость представляет собой периодически, неоднократно в пределах габаритных размеров, повторяющиеся отклонения от правильной геометрической формы. Волны могут образовываться (прил. 10) на детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в связи с чем рекомендуется различать продольную и поперечную волнистость. Если первая обычно возникает в результате вибрации технологической системы, то вторая вызывается неравномерностью подачи инструмента, неправильной правкой шлифовального круга, неравномерностью его износа и т. д. Для оценки волнистости устанавливается [90] целый ряд параметров – высотных и шаговых – однако, на практике используется высота «по десяти точкам»  $W_z$ , измеряемая аналогично параметру  $R_z$  шероховатости поверхности;

- микрогеометрические отклонения (микронеровности) – отклонения реальной поверхности от правильной геометрической формы в пределах небольших ее участков. Микрогеометрические отклонения называют шероховатостью поверхности. Шероховатость является самостоятельным показателем качества изделия.

Погрешность взаимного расположения поверхностей задается видом (непараллельность плоскостей, непараллельность осей, несоосность, неперпендикулярность и т. д.) и допустимым максимальным отклонением. При оценке величины погрешности расположения из рассмотрения исключают погрешности формы рассматриваемых и базовых элементов изделия. Для этого реальные поверхности и профили заменяют прилегающими, а за оси, плоскости симметрии и центры реальных поверхностей принимают оси, плоскости симметрии и центры прилегающих элементов.

Кроме отклонений расположения и формы существуют, так называемые суммарные отклонения. Суммарным отклонением формы и расположения называют отклонение, являющееся результатом совместного проявления отклонений формы и отклонения расположения рассматриваемого профиля или рассматриваемой по-



верхности относительно заданных баз. Суммарный допуск формы и расположения – предел, ограничивающий допускаемое значение суммарного отклонения формы и расположения. Самые распространенные виды суммарных отклонений – это радиальное и торцевое биение. Торцевое биение – разность наибольшего и наименьшего расстояний от всех точек реальной поверхности в пределах нормирующего участка базовой оси. Радиальное биение – разность наибольшего и наименьшего расстояний от всех точек реальной поверхности вращения до базовой оси в сечении плоскостью, перпендикулярной базовой оси.

Шероховатость поверхности (прил. 9) после механической обработки – это прежде всего геометрический след режущего инструмента, искаженный в результате пластической и упругой деформаций и сопутствующей процессу резания вибрации технологической системы. Шероховатость поверхности задается комплексом [28, 29] показателей, к ним относятся количественные (высотные и шаговые, для которых устанавливается диапазон или максимальное допустимое значение) и качественные (направление, способ обработки поверхности).

Кроме показателей геометрической точности существует еще целый ряд других, определяющих физико-химическое состояние и физико-механические свойства (прил. 11) материала изделия, например твердость и микротвердость поверхности изделия, глубина дефектного слоя и т. д.

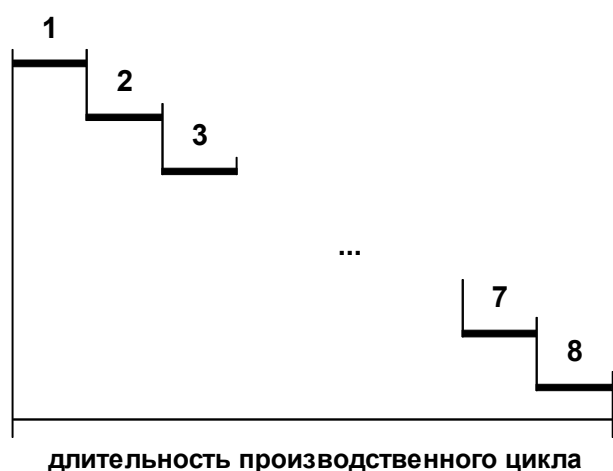
### 1.1.3. Повышение эффективности проектирования при использовании средств автоматизации

Цели создания предприятий или их реконструкция могут быть различными, но глобальные критерии оценки их деятельности – только экономические [20]: прибыльность и конкурентоспособность. На каждом этапе реконструкции, при создании каждой системы локальные критерии могут быть различными. Но они не должны противоречить глобальному и входить в общее дерево целей или критериев, разрабатываемых при обосновании программы реконструкции предприятия. Обеспечение высоких значений критериев может идти совокупно по направлениям: повышения качества изделий, сокращения и надежности сроков выполнения

заказов, индивидуализации заказов, повышения экономичности производства и его реактивности, т. е. быстрого реагирования на потребности рынка. Одни из важнейших критериев оценки эффективности – срок и надежность выполнения заказа. Высокие значения критериев могут быть достигнуты за счет таких свойств производственной системы, как совершенство конструкции изделий, использование высоких технологий, гибкости производства, его автоматизации.

Под гибкостью производства понимается его способность перестраивать свою организационную, технологическую, функциональную и другие структуры или параметры под влиянием изменений внешних или внутренних условий с целью наилучшего обеспечения принятых критериев ПС. Можно отдельно рассматривать организационную гибкость, технологическую и др. Гибкость производственной системы обеспечивает такие ее свойства, как реактивность производства, надежность выполнения заказов.

Все направления повышения эффективности производственной системы взаимосвязаны. Так совершенство конструкции определяется не только ее потребительскими свойствами, но и возможностью экономичного изготовления в условиях конкретного производства. Высокие технологии прогрессивны не сами по себе, а исходя из возможности их реализации в конкретном производстве имеющимся оборудованием и системой автоматизации. Разрешение противоречий возможно на основе оптимизации соответствующих локальных или глобальных критериев.

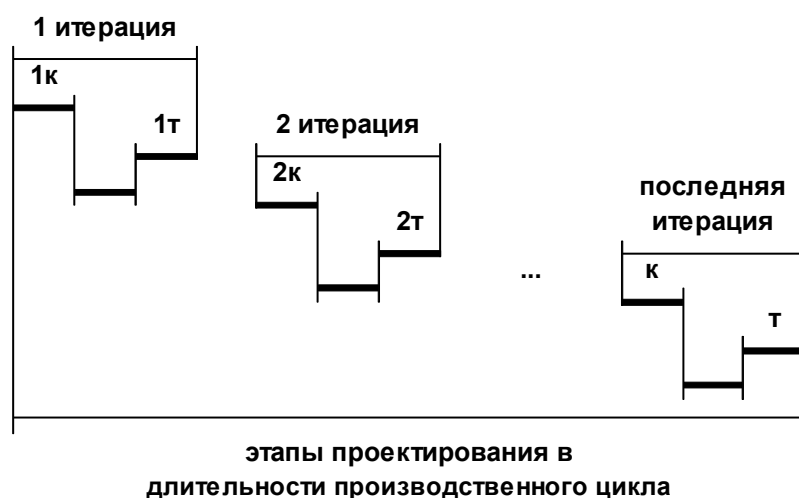


**Рис. 3. Время производственного цикла при последовательной реализации этапов:**

- 1 – маркетинг;
- 2 – проектирование изделий;
- 3 – проектирование технологии;
- 4 – материально-технологические процессы;
- 5 – производство;
- 6 – контроль и испытания;
- 7 – хранение;
- 8 – сбыт

Особое значение для повышения эффективности предприятия имеет направление автоматизации, поскольку она не только имеет самостоятельное значение, но и оказывает существенное влияние на все другие направления. Без автоматизации невозможно обеспечить гибкость производства. Без внедрения систем автоматизированного проектирования невозможно в современных условиях создать совершенные машины и технологические процессы.

Весь предыдущий опыт и здравый смысл показывают, что экономичная автоматизация [20, 38] может быть только комплексной. Частичная автоматизация может быть этапом, но не может быть целью. Более того, всякая частичная автоматизация должна вписываться в концепцию комплексной. Поскольку современное производственное предприятие работает по всем этапам жизненного цикла изделия, то и комплексная автоматизация в перспективе должна охватывать все этапы жизненного и, в первую очередь, все этапы производственного цикла (рис. 4) изделия.



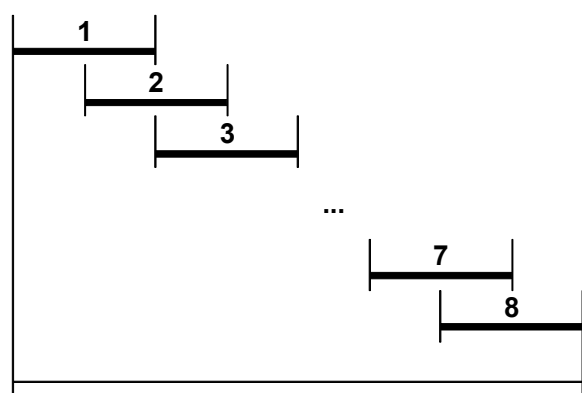
**Рис. 4. Конструкторско-технологическое проектирование при последовательной реализации этапов:**

1,2,... – итерации:  
 к – конструкторское проектирование;  
 т – технологическое проектирование.

Одной из главных задач комплексной автоматизации является уменьшение длительности производственного цикла изделия. Этого можно добиться путем сокращения длительности выполнения каждого этапа, путем уменьшения времени согласования между этапами и уменьшения количества возвратов полученных решений для дополнительной коррекции и, наконец, переходом от фазового последовательного метода выполнения этапов к параллельному.

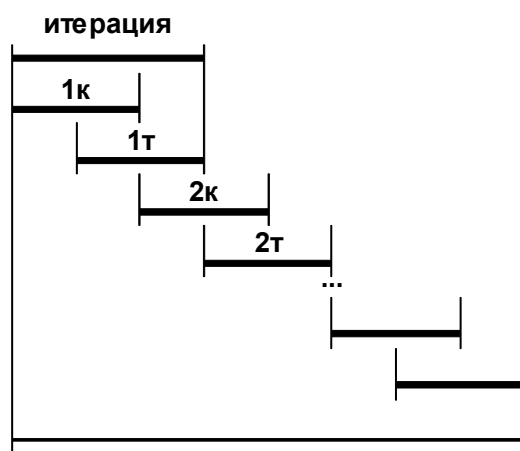
При фазовом методе все этапы производственного цикла изделия выполняются последовательно и время выполнения заказа определяется суммой времен выполнения каждого этапа. На самом деле время выполнения заказа будет больше за счет итерационного процесса (рис. 4) принятия окончательного решения по взаимосвязанным этапам. Следует также отметить, что увеличение количества заказов, их предварительная проработка и индивидуализация приводят к увеличению трудоемкости подготовительных работ, в большей степени, чем трудоемкость непосредственно самого производства. В связи с этим, время производства составляет 5...10 % от всего времени выполнения заказов. Основные резервы сокращения времени производственного цикла изделия лежат, таким образом, в сфере подготовки производства.

Идеология параллельного [96] проектирования предполагает не только совмещение выполнения этапов производственного цикла (рис. 5), но и сокращение или отсутствие межэтапных итераций (рис. 6).



длительность производственного цикла

**Рис. 5. Совмещенное проектирование: весь производственный цикл.**



этапы проектирования в  
длительности производственного цикла

**Рис. 6. Совмещенное проектирование: цикл подготовки производства.**

- 1 – маркетинг;  
2 – проектирование изделий;  
3 – проектирование технологии;  
7 – хранение;  
8 – сбыт

- 1,2,... – итерации  
к – конструкторское проектирование;  
т – технологическое проектирование

Поскольку подготовка производства в основном связана с движением и преобразованием информационных потоков, то автоматизация информационных потоков дает большую отдачу, чем автоматизация материальных потоков. Это

означает, что средства, вложенные в автоматизацию предпроизводственной подготовки, дают, как правило, большую отдачу, чем вложенные в автоматизацию собственно производства.

По проблемам автоматизации производств имеется большое количество литературы, выпущены нормативные документы и стандарты, в том числе и терминологические. Однако устоявшихся понятий, терминов, обозначений ни в России, ни в мире не существует, что часто приводит к разному пониманию существа вопросов.

Совокупность всех систем подготовки и управления образует интегрированную систему автоматизации производственной деятельности предприятия. На современном уровне автоматизации такая система обязательно включает элементы интеллектуализации и определяется как интеллектуальная интегрированная система [20] управления производственной деятельностью предприятия.

Современное предприятие в своей деятельности связано со многими другими предприятиями: смежниками, изготовителями и поставщиками комплектующих изделий, заказчиками и др. Время согласования производственных вопросов с ними влияет на общее время выполнения заказа, а его уменьшение требует в первую очередь автоматизации общих информационных потоков. Такая совокупность организационно самостоятельных, но информационно связанных между собой для выполнения определенных заказов, предприятий представляет собой виртуальное предприятие [80, 103, 113]. Для создания нового, особенно сложного наукоемкого изделия, необходима первоначальная разработка модели реализующего его ВП. Она должна включать все необходимые ресурсы для его создания и состав производств, предприятий для их реализации.

Современное предприятие должно обеспечить реализацию всего производственного цикла изделия. При этом портфель заказов может изменяться в короткие сроки, так же как и состав участвующих в его выполнении организаций. Наиболее эффективное направление сокращения времени выполнения заказов –

создание интегрированной системы автоматизации (ИСА) производственной деятельности предприятия.

Методологии построения ИСА предприятия могут быть различными [41, 47, 61]. На сегодняшний день можно выделить пять основных направления создания ИСА:

1. Разработка ИСА конкретного предприятия по его индивидуальному заказу фирмой разработчиком программных систем с применением алгоритмических языков высокого уровня.
2. Постепенная интеграция систем автоматизации ПДП путем разработки или приобретения предприятием отдельных пакетов, каждый из которых решает отдельные функциональные задачи предприятия.
3. Приобретение мощной системы комплексной автоматизации, состоящей из многих функциональных модулей, работающих в единой информационной среде системы и частично адаптированных к особенностям предприятия.
4. Создание ИСА из отдельных систем, подсистем, пакетов, имеющих возможность представления своих выходных данных и знаний в информационной среде предприятия.
5. Ускоренное создание ИСА конкретного предприятия под его индивидуальный заказ с применением инструментальной программной метасистемы при участии специалистов предприятия.

Каждое направление поддерживается различными программными продуктами, опирается на разные методы и технологии комплексной автоматизации, требует различных затрат предприятия и приводит к различным конечным результатам. К настоящему времени определены [20, 113] принципы, на которых должны строиться современные ИСА:

- компьютерно-ориентированная автоматизация всех этапов жизненного цикла изделия;
- интеграция всех систем автоматизации производственной деятельности внутри одного предприятия;

- интеллектуализация;
- специализация ИСА каждого предприятия;
- индивидуализация рабочего места ИСА предприятия;
- использование современных информационных технологий инжиниринга.

Эффективность компьютерной автоматизации предприятий определяется значительными успехами информационных технологий инжиниринга (ИТИ), базирующихся на разрабатываемых в последние годы технологиях обработки и передачи информационных потоков [44, 45, 53, 78, 79]: CALS, CASE, RAD, СПРУТ, РДО и др. ИТИ позволяют сократить время выполнения заказов за счет ускорения выполнения каждой функциональной задачи, совмещения во времени выполнения всех этапов производственной деятельности, организации виртуальных проектных бюро, обеспечивающих согласованную работу виртуального предприятия.

Этапы технологии комплексной автоматизации предприятия.

1. Осознание руководством предприятия необходимости его автоматизации. Изучение современного состояния проблемы, альтернативных направлений технической политики в области автоматизации и последствий их проведения на предприятии.
2. Целевое обследование профессиональными в этой области специалистами и анализ деятельности предприятия.
3. Синтез решений и принятие стратегии реинжиниринга предприятия.
4. Концептуальное проектирование состава и структуры ИСА предприятия. Разработка бизнес-плана.
5. Выбор инструментальной системы проектирования и организации-разработчика. Определение этапов создания ИСА.
6. Структурирование данных и знаний предприятия, формирование архитектуры системы, информационной среды.
7. Разработка интеллектуальной системы моделирования деятельности предприятия.
8. Выбор технических средств, специальных внешних программных пакетов.

9. Техническое проектирование ИСА, формирование АРМ, обучение персонала.
10. Поэтапный ввод системы, опытная подконтрольная эксплуатация, корректировка решений.
11. Опытная эксплуатация при консультации системных специалистов.
12. Рабочая эксплуатация системы, интеллектуальное моделирование деятельности предприятия с поиском перспективного развития.
13. Поэтапное развитие ИСА предприятия.

При разработке ИИС каждого предприятия, как и при создании любой сложной системы, особое значение имеют начальные этапы проектирования, завершающиеся этапом концептуального проектирования. От них в наибольшей степени зависят правильность и эффективность всех дальнейших разработок. В состав задач этих этапов входят: формирование целей и задач автоматизации, критериев и показателей, выбор направлений и основных положений автоматизации и реинжиниринга, проведение целевого обследования предприятия, определение финансовых возможностей и этапов реализации, составление бизнес-плана. Только на основании полученных решений и долгосрочного планирования возможен переход к этапу приобретения и разработки программно-технических средств (ПТК). Опыт показывает, что большинство неудач связано с пренебрежением или поверхностным отношением к выполнению начальных этапов. Руководитель предприятия должен понимать, что от принятых на этих этапах решений зависит эффективность работы предприятия на многие годы вперед, возможность его долгосрочного конкурентоспособного существования. Решения, принятые на основании текущего состояния без глубокого перспективного предвидения, могут привести предприятие к тупиковому пути развития, свернуть с которого без больших и неоправданных финансовых затрат будет невозможно.

Можно выделить типичные ошибки концептуального проектирования:

- ориентация на приобретение или разработку мощного, но слабо адаптированного к возможностям предприятия, пакета комплексной автоматизации;
- базирование на систему:



- не допускающую к работе в ее среде «чужие» пакеты;
- трудно поддающуюся изучению и развитию, не имеющую для этого инструментального и кадрового обеспечения;
- обладающую большой избыточностью в целом или на отдельных рабочих местах, имеющую в связи с этим большую стоимость и сложности в изучении;
- выходная информация которой несовместима с видом представления информации смежных организаций;
- методология построения которой морально устарела, и поэтому предполагает, через короткое время, полный отказ или замену с соответствующими экономическими потерями.

К выполнению начальных этапов концептуального проектирования должны быть привлечены независимые организации и эксперты, имеющие опыт выполнения подобных работ, проблемные специалисты предприятия и, для консультаций, специалисты фирм разработчиков систем комплексной автоматизации.

Выбор направления автоматизации является одним из ключевых вопросов начальных этапов реконструкции предприятия, определяющим методологию дальнейших работ, приобретаемые ПТК, и, в целом, эффективность автоматизации. Причем не только на ближайшие годы, но на достаточно длительную перспективу. Конечно, выбор направления зависит от реальных условий состояния предприятия и должен определяться на этапе концептуального проектирования. С нашей точки зрения в большинстве случаев современным требованиям и положениям ИТИ отвечает пятое из указанных выше направлений.

ИСА, реализованная на указанных выше принципах, представляет интеллектуальную интегрированную систему (ИИС) предприятия. Основу ИИС составляют программно-функциональные модули (ПФМ), позволяющие на основе унифицированных производственных правил и локальных баз данных решать определенные функциональные задачи производства [19, 21, 40]. При создании ИИС предприятия могут использоваться отдельные программные пакеты, совместимые

с единой средой ИИС. Такие пакеты могут входить в состав отдельных ПФМ. Со-  
вокупность ПФМ, относящихся к решению определенной производственной про-  
цедуры, представляет собой прикладную систему автоматизации одного из этапов  
производственной деятельности, например, систему планирования, документиро-  
вания, проектирования технологических процессов, диспетчирования и т. п.

Правила формирования состояния объектов и ресурсов для их производства,  
определение их характеристик представляют совокупность инженерных знаний.  
Их можно разделить на специализированные и базовые, инвариантные к объекту  
производства. Такая обобщенная совокупность знаний представляет базу знаний  
конкретного производства. Для проектирования таких сложных, плохо формализу-  
емых систем, как АПС и объекты их производства, базы знаний включают, кроме  
декларативных и алгоритмических процедур, интеллектуальные знания в виде ло-  
гико-лингвистических моделей [19, 40].

Единая информационная среда предприятия строится на основе унифициро-  
ванного представления и обмена данными и знаниями для всех систем, входящих  
в ИИС, общей базы данных и моделей их обработки, соблюдения стандартов, поз-  
воляющих обмениваться информацией с внешними системами. Если в функции  
ИИС предприятия входит и ее развитие, последняя может быть дополнена инстру-  
ментальной программной системой предприятия.

Существенным является то, что на каждом этапе проектирования создается  
не только информационный образ элемента, но также параметризованная проце-  
дура его проектирования. Это позволяет зафиксировать в базе знаний сам процесс  
создания нового объекта и использовать его для ускоренной технической подго-  
товки и управления производством при выполнении заказа на производство изде-  
лия определенного класса. Техническая подготовка и управление производством  
изделия осуществляются на основе созданных процедур путем введения только  
данных о параметрах требуемого изделия [92].

ИИС предприятия является непрерывно развивающейся системой. Однако ве-  
сти поиск лучших направлений развития на действующем производстве не пред-

ставляется возможным. Поэтому одновременно с разработкой ИИС создается имитационная модель функционирования предприятия совместно с ИИС. Она служит инструментальным средством для получения лучших решений при создании и эксплуатации ИИС и осуществляет поиск ее выгоднейшего развития. После проведения мероприятий по развитию предприятия и ИИС соответственно изменяется и сама имитационная модель.

Специфическими для каждого предприятия являются база данных предприятия, инженерные знания, в виде процедур проектирования и управления, система документирования и др. Поэтому инженер-системотехник обеспечивает ускоренное проектирование программной среды предприятия с помощью инструментальной программной метасистемы (ИПМ). Содержательное наполнение баз данных и знаний проводится силами специалистов предприятия. Такой подход позволяет оснастить каждое рабочее место инженера предприятия программной поддержкой, в значительной степени используя накопленный опыт предприятия и инженерные знания конкретного специалиста.

Комплексная автоматизация на основе новых информационных технологий инжиниринга требует индивидуального проектирования ИИС для каждого предприятия. При этом, как правило, необходимы изменения его организационной структуры и технологий решения функциональных задач, методов представления, обмена производственными данными и знаниями. ИИС каждого предприятия имеет свои специфические особенности. Она требует специальной разработки и не может создаваться путем тиражирования ранее разработанных систем автоматизации других предприятий или приобретения готовых законченных систем. Каждое предприятие имеет отличные от других состав и структуру прикладных систем, базы данных, инженерные знания, системы документирования.

Рассмотренная технология автоматизации предполагает унификацию представления, обмена и структурирования данных и знаний об объектах и процессах. Разрабатываемые в разных системах компьютерные модели представления изделий и технологического оснащения несовместимы друг с другом. Это создает

трудности при обмене данными между различными подсистемами ИИС и еще большие трудности при информационном обмене между предприятиями. Поэтому важнейшей задачей комплексной автоматизации предприятий является разработка нормативной, методической базы унификации представления данных и знаний и средств их программной поддержки [3, 16].

В настоящее время при разработке систем автоматизации производственной деятельности имеют место все указанные выше направления. Все они поддерживаются теми или иными программными пакетами или системами. В то же время ни одна из существующих систем в полной мере не отвечает [20] принципам построения и функционирования ИИС. Практически все системы автоматизации претендуют на универсальность и в малой степени допускают адаптацию к производственным условиям конкретного предприятия. Средством реализации описанных выше принципов являются системы автоматизированного проектирования (САПР), представляющие собой: «...организационно-технические системы, состоящие из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанного с подразделениями проектной организации, и выполняющие автоматизированное проектирование» [23, 27, 88]. В то же время, достаточно часто используется упрощенная формулировка: «САПР – это инструментарий проектировщика, включающий технические средства автоматизации проектных работ, математическое, программное, информационное, языковое, организационное и методическое обеспечение и предназначенный для автоматизации проектирования на всех этапах от выдачи технического задания до передачи технической документации заказчику» [99]. В двух приведенных формулировках – стандартной и общепринятой – содержится разногласие: то, что по стандарту считается системой, во втором определении объявляется только инструментом, обеспечивающим функционирование системы в-целом. Видимо [93, 94], стандарт также не дает однозначного определения САПР, поскольку не указывает необходимых составляющих системы, но в стандартной формулировке приводятся принципиальные свойства системы:

1. САПР – организационно является технической системой, в которой комплекс

средств автоматизации взаимосвязан с подразделениями проектной организации.

## 2. САПР выполняет проектирование.

Рассматривая вопрос о составляющих САПР с точки зрения обеспечения свойств системы, можно сделать вывод о том, что проектировщики также являются составным элементом САПР. Вследствие этого можно сделать заключение о невозможности проектирования САПР вне конкретно указанного предприятия, на котором эта система будет эксплуатироваться и, следовательно, о невозможности тиражирования работающей САПР. Тиражирование возможно только в отношении составных элементов САПР – комплекса средств автоматизации.

Из определения САПР следует, что целью функционирования системы является процесс проектирования, – то есть процесс переработки информации, приводящий к получению полного представления о проектируемом объекте и, в случае САПР технологии, способах его изготовления. Общеизвестно, что проектирование является одним из наиболее сложных видов интеллектуальной работы, выполняемой человеком. Более того, как правило, этот процесс выполняется творческим коллективом с разграниченными, по возможности, обязанностями каждого из участников работы. Как следствие, проектирование является процессом весьма сложным и трудно поддающимся формализации. Очевидно, что для автоматизации проектирования необходимо четко знать, что этот процесс представляет собой и каким образом выполняется каждым из разработчиков проекта. Можно сказать что, вне зависимости от объекта проектирования, сам процесс переработки информации включает в себя решение задач двух основных классов – формализованных и неформализованных (или частично формализованных).

Определим основные свойства этих классов задач. Для этого сформулируем основные признаки формализации (табл. 1).

1. *Однозначность структуры набора и существование числовой (дискретной) формы* представления исходных данных. Исходные данные для решения задачи могут быть представлены в виде набора числовых (поддающихся математической обработке) величин. Количество и последовательность значений в наборе и мате-

математические свойства каждого значения могут быть определены заранее. Существуют математические методы проверки корректности набора исходных данных, в целом, и каждого значения, в отдельности.

2. *Наличие математического алгоритма* решения задачи. Существует строгая последовательность действий, описанных в математических формулах, позволяющая установить однозначное соответствие между двумя наборами числовых (дискретных) величин: набором исходных данных и результатом решения задачи.

Здесь следует уточнить понятие «наличие». Наличие алгоритма, как существование (разработанность) собственно математических методов решения не означает доступность этого алгоритма определенному кругу специалистов. Так, например, если некоторый алгоритм не может быть применен специалистом с нематематическим образованием, – это означает, с точки зрения «нематематика», что такого алгоритма не существует. Поэтому важным фактором, определяющим возможность применения алгоритма становится существование, так называемой, содержательной постановки задачи. т. е. описания соответствия между математическими и предметными (не математическими) терминами при определении исходных данных и метода решения задачи.

3. *Однозначность результата* решения задачи. Если для задачи существуют корректные исходные данные, то решение в соответствии с математическим алгоритмом даст единственно возможный набор результирующих значений. Однозначность может быть нарушена только в результате ошибок, допущенных в ходе выполнения алгоритма.

**Таблица 1**  
**Уровни формализации задачи**

Уровень	Исходные данные		Математический метод		Результат	
	Набор	Форма	Алгоритм	Постановка	единственный	множество
Высокий (формализованная задача)	+	числовая	+	+	+	
Частично формализованная задача	+	числовая	+	±		+
Низкий (неформализованная задача)	–	произвольная	–	–		+

При решении определенного класса формализованных задач предполагается существование неоднозначности результата. Оптимизационные математические задачи допускают существование непустого множества (больше одного набора) различных правильных результатов решения. Далее мы покажем, что в этих задачах неоднозначность результата возникает только при недостаточности исходных данных. В зависимости от уровня формализации проектной задачи используются различные методы решения:

- формализованная задача *решается математически*; в условиях использования средств автоматизации проектирования для решения формализованных задач создаются прикладные программные средства;

- частично формализованная задача *решается комбинацией способов*:

- *декомпозиция* – задача представляется в виде последовательности подзадач, каждая из которых решается как самостоятельная задача – с оценкой уровня формализации и выбором метода решения;

- *подбор аналогов* – в инженерной практике чаще используется термин «типовое решение» – из множества (каталоги, базы знаний, базы данных) ранее решенных инженерных задач выбирается подобная решаемой; критерии подобия могут быть общепринятыми или устанавливаются специалистом, решающим задачу; затем выполняется адаптация типового решения под исходные данные решаемой проектной задачи;

- *математическое решение* – для подзадачи с высоким уровнем формализации;

- неформализованная задача *решается комбинацией способов*:

- *математическое решение обратной задачи* – если проверка правильности результатов решения может представлена как самостоятельная задача с высоким уровнем формализации;

- *подбор аналогов*.

Сложность автоматизации процесса проектирования состоит в разбиении решения всей проектной задачи на последовательность этапов (локальных задач),

каждый из которых является, по возможности, задачей формализованной. Для этого создается описательная модель процесса проектирования, в которой этапы формулируются в зависимости от некоторого функционального признака (например, специализации конкретного проектировщика) как виды работ. Виды, в свою очередь, дробятся на проектные операции, для которых существует автоматизированный инструментарий или алгоритм выполнения операции, – а значит, может быть создан инструментарий, – или автоматизация операции невозможна. Особую сложность в плане проектирования САПР представляет технология изготовления изделий (САПР ТП), поскольку собственно технология в машиностроении представляет собой описательную модель производства, для которой не разработаны однозначные математические алгоритмы.

### **1.2. Методология создания сложных технологических систем**

В современных условиях конкурентной борьбы качество продукции является конечной целью производителя и определяет его ценность в глазах потребителя при последующей эксплуатации. Для обеспечения относительно низкой стоимости высокоценной продукции, существенного сокращения затрат на реализацию наукоемких технически сложных проектов, организации кибернетических работ в жизненных циклах производства создаются и внедряются в промышленность принципиально новые сложные технологические системы (ТС).

Технологическая система – это разработанная параллельно с конструкцией изделия сквозная, комплексно спроектированная технология, основанная на конструкторско-технологических решениях (КТР), методология которой включает пять новых принципов.

КТР – это комплексное решение, реализованное в конкретном изделии, в котором определяются значения конструктивных параметров изделия и оптимальный технологический процесс получения этих параметров. Основа ТС – совместимость во времени и пространстве проектно-конструкторских работ по созданию изделий и технологических работ по подготовке их производства; совмещение конструкторской и технологической обработки изделий, управления ТС при



обеспечении качества продукции в производстве. Сформулированы совмещенные принципы композиционного проектирования и управления ТС при обеспечении качества продукции.

В настоящее время для ТС характерно соответствие между требованиями рынка и возможностями производственной базы с оперативным отходом от однородной продукции к многономенклатурной. Большое внимание уделяется технологиям анализа перепроектирования (реформированию или реинжинирингу) и структурной перестройке производства, гибко реагирующей на меняющийся рыночный спрос и выпуск новых изделий.

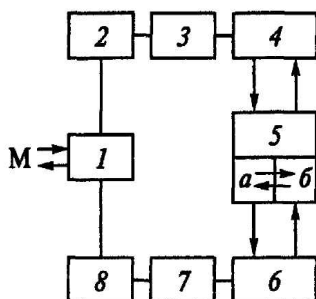
Указанная совместимость обеспечивается КТР и принципами [20, 80, 113], заложенными в технологические системы и составляющими основу методологии их разработки.

1. Принцип *комплексного проектирования*, суть которого заключается в интеграции процессов конструкторского и технологического проектирования, управления при обеспечении качества продукции в производстве.
2. Принцип *параллельной разработки*. Процесс создания изделия охватывает параллельное проектирование конструкции и технологии, проходя по замкнутой схеме с выходом и входом на требования рынка (рис. 7). Звено «производственная подготовка» (ПП) замыкает цикл создания изделия и занимает промежуточное положение между проектированием конструкции и технологией. ПП реализуется в последовательности структурной схемы с разделением на конструкторскую подготовку производства (рис. 7, блок 5 а, «КПП») и технологическую подготовку производства (рис. 7, блок 5 б, «ТПП»).

В проектировании конструкции и технологии из комплекса создания изделия выделяют комбинацию конструкция – технология – ТПП и представляют двумя структурными комплексами с последовательным и параллельным соединениями (см. рис.4, 6).

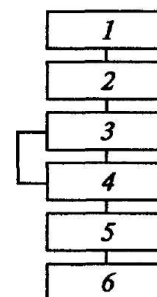
Последовательная структура комбинации (см. рис. 4) – традиционная, более привычная и простая, но уступает параллельной для автоматизированного произ-

водства. Преимуществом параллельной структуры (см. рис. 6) является сокращение цикла создания изделия за счет совместных проектных работ при совмещении конструирования и разработки технологического процесса, а также лучшего общего воздействия на ранние стадии создания изделия.



**Рис. 7. Цикл непрерывного создания изделия машиностроения:**

- 1 – запрос;
- 2 – технико-экономическое обоснование;
- 3 – конструкторские разработки;
- 4 – конструкторская документация;
- 5 – производственная подготовка;
- 6 – календарное планирование;
- 7 – производство;
- 8 – управление качеством, сертификация



**Рис. 8. Укрупненная структурная схема ТПП:**

- 1 – анализ технических требований;
- 2 – разработка технологического маршрута;
- 3 – выбор оборудования;
- 4 – техническое нормирование;
- 5 – разработка технологической документации;
- 6 – постановка на производство

Технологическая подготовка производства реализуется в последовательности, изображенной на структурной схеме (рис. 8), и с учетом комплексности технологических процессов проводится по разным производственным подразделениям предприятия: заготовительному, термическому, механообработки, контроля и испытаний.

1. Принцип «сквозной технологии», суть которого состоит в том, что технология, как функция требуемых характеристик изделия, охватывает все этапы производства.
2. Принцип инверсии технологии, суть которого состоит в необходимости движения от характеристик изделий к технологиям испытаний, контроля, общей сборки и далее до технологии формообразования.
3. Принцип обеспечения технологичности – создание в составе конструкторской документации технологической документации, содержащей свойства технологии,

требуемой для данной конструкции.

Технологическая подготовка производства (ТПП) – совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятий к выпуску изделий заданного уровня качества при установленных сроках, объеме выпуска и затратах.

Основные функции ТПП:

- обеспечение технологичности конструкции изделия;
- разработка технологических процессов;
- проектирование и изготовление средств технологического оснащения;
- управление процессом ТПП изделия.

Три подхода к решению задач подготовки производства:

- традиционный, основанный на экспертном методе проектирования;
- смешанное компьютерное проектирование;
- автоматизированное компьютерное проектирование.

Традиционный подход включает изучение рабочих чертежей конструкции, технологического маршрута и инструкций, созданных экспертным методом. Вырабатывается на аккумулировании знаний о процессах и технологическом оборудовании, обрабатываемости материалов, инструменте и на основе накопившегося практического опыта обработки с наименьшими потерями. При высокой трудоемкости и больших недостатках этот подход бывает эффективным для серийного выпуска изделий на малых предприятиях с совмещенным производством. Опытный проектировщик может выполнить эффективную и безальтернативную подготовку в полном соответствии с экономическими требованиями, достаточно гибкую, с небольшими финансовыми вложениями.

Применение подхода ограничивается частой перестройкой подготовки производства и сложностью выполняемых работ, увеличением числа обрабатываемых деталей, применяемого инструмента и приспособлений. Тогда становится неизбежным применение компьютерного проектирования.

Смешанное компьютерное проектирование расширяет возможности традиционного подхода и основывается на принципах групповой технологии, классификации и кодировании деталей. Процесс обработки выбирается из числа действующих на предприятии или применяется гипотетический процесс, разработанный для группы деталей с условной доминирующей (комплексной) деталью.

При компьютерном проектировании резко сокращается время на проектирование, проектировщик освобождается от рутинных работ, уделяет больше внимания качеству труда. Недостаток процедуры – ее смешанный характер, проявляемый во взаимодействии автоматизации с личным участием проектировщиков разных профессиональных качеств.

Автоматизированное компьютерное проектирование реализуется с программно-алгоритмическим обеспечением, включающим логические решения, формулы. В отличие от смешанного компьютерного проектирования, рассматривается не групповая технология со множеством решений, а единичная на каждую деталь.

Три процесса управления качеством проектирования в механообработке:

- компьютерное проектирование;
- оптимизация параметров механической обработки;
- адаптивный подход.

### **1.3. *Проектирование технологии изготовления машиностроительной продукции***

#### **1.3.1. Степень формализации технологических проектных задач**

Работы по проектированию технологии изготовления машиностроительной продукции традиционно выполняют в процессе технологической подготовки производства изделий или отдельных узлов и деталей.

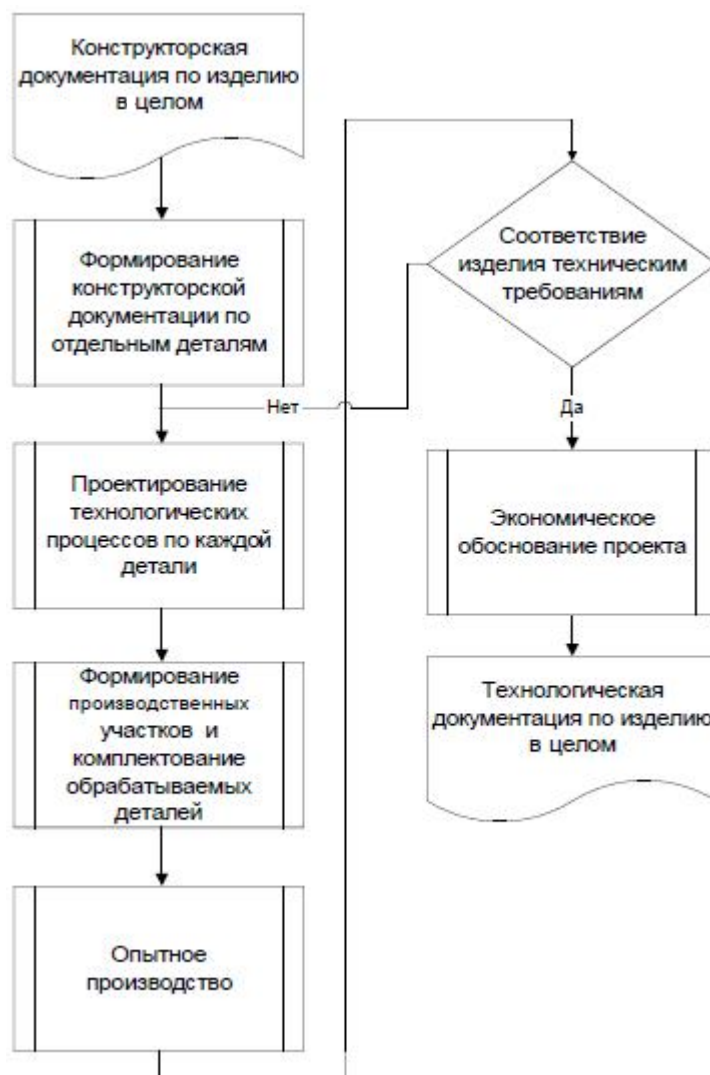
Исходные данные для технологического проектирования представляются в виде технической (конструкторской и эксплуатационной) документации на изделие, подлежащее производству. Результаты работы технологической службы включают в себя технологическую документацию, конструкторскую документацию по

нестандартному оборудованию, планировки производственных помещений и экономическое обоснование проекта производства.

Укрупненная схема (рис. 9) процесса технологического проектирования [30, 31] включает в себя основные этапы предпроизводственной подготовки, выполняемые технологической службой предприятия. Каждый из этих этапов состоит из большого числа самостоятельных (табл. 2, 3) проектных задач, весьма сложных в формализации. Рассмотрим подробнее эти задачи, одновременно определяя уровень возможной автоматизации их решения и пригодные для этого программные средства. Уровень формализации задачи определим следующим образом:

высокий уровень характерен для тех проектных задач, для которых существуют математические формулировки условий задач (содержательные постановки) и разработаны математические методы решения;

частичная формализация свойственна задачам, которые традиционно решаются методом декомпозиции или подбором аналога (существует типовое решение), или в задаче существует алгоритм решения но, к настоящему времени, не разработана содержательная постановка;



**Рис. 9 Последовательность решения задач технологической подготовки производства**

низкий уровень формализации предполагает отсутствие содержательной постановки и математических методов решения задачи вкупе с отсутствием или недоступностью типовых решений или невозможностью декомпозиции.

**Таблица 2**  
**Задачи проектирования технологических процессов**

Выполняемые действия	Исходная информация	Уровень формализации	Необходимые программные средства	Примечания
1. Выделить на чертеже детали простые геометрические элементы – плоскости, цилиндры, сферы	Рабочий чертеж детали	Частичная	Векторный графический редактор	–
2. Определить последовательность обработки элементарной поверхности в зависимости от требуемой точности и качества поверхности	Рабочий чертеж детали. Таблицы точности обработки Типовые технологические процессы	Высокая	Информационная система	Выполняется для каждой элементарной поверхности
3. Выполнить оптимизацию последовательности обработки по заданному экономическому критерию	Элементарные технологические процессы	Частичная	Пакет программ, реализующих методы линейного программирования	Выполняется для каждой элементарной поверхности
4. Определить схему базирования детали при обработке	Рабочий чертеж детали	Низкая	–	Выполняется для каждой элементарной поверхности
5. Сгруппировать поверхности для многоинструментальной обработки или обработки специальным инструментом по подобию схем базирования и с учетом возможности одновременной обработки. Сформировать технологические операции.	Схемы базирования	Низкая	–	Выполняется для каждой поверхности и каждого этапа последовательности обработки.
6. Построить операционные эскизы, выбрать метод изготовления заготовки, спроектировать заготовку.	Рабочий чертеж детали Структура технологических операций	Частичная	Векторный графический редактор	Для каждого варианта технологического процесса

Продолжение табл. 2

Выполняемые действия	Исходная информация	Уровень формализации	Необходимые программные средства	Примечания
7. Выполнить анализ точности, достижимой в результате обработки. Выбрать варианты технологических процессов, обеспечивающих требуемую точность.	Рабочий чертеж детали Рабочий чертеж заготовки Структура технологических операций	Высокая	Пакет программ, реализующих методы линейного программирования	Для каждого варианта технологического процесса
8. Выполнить техническое нормирование обработки и оснащение технологического процесса основным оборудованием и инструментами.	Технологический процесс Структура технологических операций	Высокая	Информационная система	Для каждого варианта технологического процесса
9. Укрупненно определить технологическую себестоимость Выбрать оптимальный технологический процесс	Технологический процесс	Высокая	Информационная система	Для каждого варианта технологического процесса
Примечание: этап № 3 не выполняется, если на этапе № 2 определен единственный вариант обработки; если этап № 7 не выполняется, дальнейшие расчеты проводятся только для одного варианта технологического процесса.				

В табл. 2 названы задачи, решаемые (рис. 9) на этапе «Проектирование технологических процессов для каждой детали». Следует отметить, что традиционно некоторые этапы проектирования, такие как, например, точностной анализ маршрутного технологического процесса, не выполняются, или заменяются экспериментальной проверкой в условиях опытного производства. Связано это со сложностью выполнения подобных расчетов «вручную», что ведет к увеличению предпроизводственных затрат.

После выбора варианта обработки и изготовления каждой из деталей изделия выполняется конструкторское проектирование нестандартного технологического оборудования. Исходными данными для конструирования являются схемы (табл. 2, п. 5) базирования и закрепления деталей при выполнении операций технологического процесса. Как правило, для решения этой задачи, в технологической службе предприятия формируется конструкторское подразделение. Повысить эффективность оснащения технологического процесса вспомогательным инстру-

ментом возможно при использовании текстово-графических информационно-справочных систем с возможностями векторного графического редактора.

**Таблица 3**  
**Формирование производственных участков**

Выполняемые действия	Исходная информация	Уровень формализации	Необходимые программные средства	Примечания
1. Определить способ расстановки оборудования на производственном участке и параметры производственного помещения (сетка колонн, проезды, вспомогательные помещения)	Технологический процесс СНИП	Частичная	Информационная система Векторный графический редактор	—
2. Выполнить «расстановку» основного технологического оборудования на производственном участке	Принятый способ расстановки Паспортные данные оборудования СНИП	Низкая	Информационная система Векторный графический редактор	Возможна оптимизация (минимизация) производственных площадей
3. Определить места подвода энергоносителей и технологических сред, расставить вспомогательное оборудование и средства межоперационного транспорта	Паспортные данные оборудования СНИП	Низкая	Информационная система Векторный графический редактор	—
4. Сформировать спецификации применяемого оборудования	—	Высокая	Информационная система	—

Опытное производство выполняется для экспериментальной проверки результатов технологического проектирования и практического обнаружения допущенных несоответствий.

### 1.3.2. Возможность применения математических методов в технологическом проектировании

В современном машиностроении трудоемкость технологического проектирования, особенно в серийном производстве, может составлять более 60 % общей продолжительности производственного цикла – от задания на проектирование до начала промышленного производства следующего изделия. Увеличение номенклатуры и, следовательно, скорости обновления производства, приводит к резкому со-



кращению сроков подготовки производства и возрастанию значимости технологического проектирования в оценке общей эффективности инжиниринга.

Повысить эффективность технологической подготовки производства можно за счет автоматизации проектирования. Однако существующие на данный момент системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) не учитывают особенности конкретных производственных систем и, по сути, являются автоматизированными справочниками и средствами оформления технологической документации. Такой вывод можно сделать, анализируя «технологические» возможности (табл. 4) наиболее распространенных средств автоматизации технологического проектирования.

**Таблица 4.**  
**Возможности технологических САПР**

Типовая задача технологического проектирования	САПР ТП					
	TechnologiCS	Sapr 2003	ADEM	SolidWorks	Компас-автопроект	Г – FLEX ТехноПро
Конструкторское проектирование	+	+	+	+	+	+
Маршрутное технологическое проектирование:						
типовое	+	+	+	±	+	+
групповое	–	–	+	–	–	–
индивидуальное						
по заданным показателям качества (точности) одной поверхности	+	+	+		+	–
по заданным показателям качества (точности) группы поверхностей или изделия в целом	–	–	–	–	–	–
Техническое нормирование	+	+	+		+	+
Расчет операционных припусков	+	+	+		+	–
Формирование технологической документации	+	+	+	+	+	+
Программирование для станков с ЧПУ	+	–	+	+	+	+
Выбор оборудования и инструмента	+	+	+	±	+	+
Условные обозначения:   +   поддерживается системой ±   частично поддерживается системой –   не поддерживается системой						

В большинстве технологических САПР хорошо проработаны вопросы автоматизации решения, так называемых, «формализованных», вычислительных задач, таких как расчет операционных припусков, режимов резания, определение

норм времени на обработку; задач информационного поиска или формирования бланковой документации. К разряду технологических обычно относят также задачи автоматизированной (автоматической) генерации управляющих программ обработки деталей на станках с ЧПУ. Как правило, САПР, решающие эти задачи, уже называют технологическими. Однако следует заметить, что в основе проектирования технологии механической обработки лежат проблемы формирования заданного качества деталей. Большинство изделий машиностроения характеризуется достаточно простой геометрической формой и, следовательно, точность отдельных поверхностей может быть обеспечена относительно несложными методами формообразования. Качество изделия в целом определяется не столько геометрической точностью отдельных поверхностей, сколько точностью взаимного расположения поверхностей и микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками обработанных поверхностей. Такие показатели качества обеспечиваются, соответственно, выбором не только методов окончательной обработки, но выбором базовых поверхностей и последовательности обработки и смены баз. При определении вариантов последовательностей обработки элементарных поверхностей особое внимание следует уделять соответствию реально достижимых параметров качества заданным.

Исследованиями в области проектирования технологии и организации ТП занимались С. П. Митрофанов [71] (групповой подход к проектированию ТП), А. П. Соколовский [97] (типовой подход), Б. М. Базров [4] (модульная технология), А. В. Королев (концепция гибких производственных систем). Так как использование принципов типового и группового технологического проектирования позволяет применить для решения проектных задач методы информационного поиска, то и в большинстве современных технологических САПР эти задачи проработаны достаточно хорошо. Однако, в целом, маршрутное технологическое проектирование традиционно считается «неформализованной» задачей и, как следствие, в современных САПР ТП эта задача практически не решается. Один из методов решения подобных задач предусматривает формализованную проверку

«правильности» результатов, полученных при решении исходной задачи другими методами (декомпозиция или поиск аналога). В случае маршрутного технологического проектирования такая обратная задача реализована в методике размерного [46, 87] анализа технологического процесса.

Методику размерного анализа можно признать наиболее удачной попыткой формализации связей между последовательностью применения методов обработки отдельных поверхностей и точностными показателями изделия в целом. Данная методика позволяет представить технологическую последовательность в виде системы линейных уравнений. Определенную сложность представляет задача генерации системы уравнений. Если представить расчетную схему (рис. 10) технологического процесса в виде ориентированного графа (рис. 11), то можно применить для построения системы уравнений алгоритм, известный под названием «Задача Эйлера» или «Задача о кенигсбергских мостах». Штриховыми линиями на рис. 11 показаны замыкающие звенья  $10=11$  и  $41=40$ , сплошными линиями – размеры заготовки и операционные размеры. Построить граф можно, применив алгоритмы информационного поиска к массиву данных, описывающих отдельные операции обработки (установы).

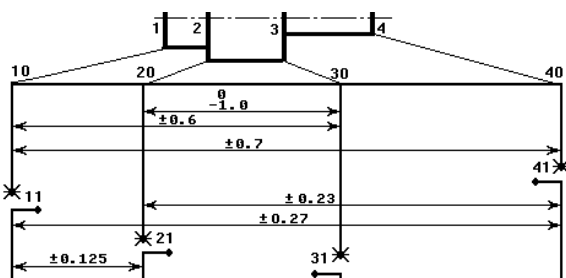


Рис. 10. Фрагмент расчетной схемы технологического процесса (по В. В. Матвееву)

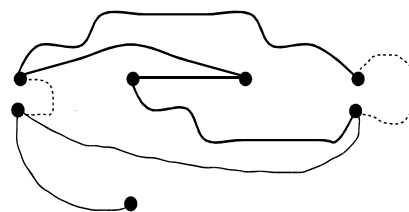


Рис. 11. Представление расчетной схемы в виде графа

Используя любой из алгоритмов поиска Эйлеровых путей в графе, можно проверить наличие связей между границами замыкающих звеньев и, таким образом, получить описание графа в виде системы линейных уравнений. Таким образом, задача сводится к одной из задач линейного программирования, решение которых не представляет особой сложности.

Использование алгебраических структур дискретной математики позволяет автоматизировать не только решение задач проверки правильности технологического процесса, но и собственно проектирование маршрутной технологии, которая и есть структура технологического процесса. Ранее выполненные [62, 64, 65, 84] исследования показывают, что применение табличных моделей данных, широко распространенных в традиционном проектировании, не позволяет в полной мере использовать современные математические методы. Анализ таблиц точности обработки позволяет построить «граф обработки поверхности», в котором можно искать или Эйлеровы пути – все возможные последовательности, или кратчайший (задав критерий длины каждого ребра графа) маршрут – оптимальную последовательность.

Таким же образом к методам линейного программирования можно свести задачи расчета оптимальных режимов обработки, расчета межоперационных заделов, синхронизации по времени отдельных операций при проектировании поточного производства и т. д.

#### ***1.4. Повышение эффективности предпроизводственной подготовки в условиях применения САПР технологии***

При автоматизированном проектировании технологических процессов в комплексе задач, решаемых САПР, значительное место занимают вопросы точностного анализа процесса обработки (операционные размеры, припуски, размеры заготовки), а также анализа точности результатов технологических процессов (размеры готовой детали). Особое значение приобретают формализация и реализация на ЭВМ моделей размерного анализа, позволяющих проводить прогнозирование точностных характеристик технологических процессов на стадии проектирования, где поиск рациональных решений не связан с существенными материальными затратами как, например, в условиях опытного производства. Для автоматизации процесса проектирования необходимо разделить всю совокупность работ на отдельные этапы и, соответственно, разделить обязанности между исполнителями работы – проектировщиками. Необходимо сформулировать различия

между проектировщиками, занятыми технологическим проектированием – будем называть их пользователями САПР (или просто пользователями) и исполнителями, решающими задачи автоматизации работ в технологической службе. На рис. 12 представлена структурно-функциональная схема технологической САПР, позволяющей решать следующие задачи:

- технологический анализ чертежа с определением возможности обработки изделия в условиях автоматического или автоматизированного производства;
- выбор рациональных способов получения заготовок;
- выделение множества элементов, обрабатываемых на каждом этапе технологического процесса и компоновку технологического процесса по операциям, переходам;
- выбор схем базирования и закрепления заготовок в процессе обработки и точностной анализ обработки;
- определение операционных размеров, размеров заготовки, межоперационных и суммарных припусков с учетом требований к точности размеров и взаимного расположения поверхностей;
- генерацию операционных эскизов;
- оснащение технологического процесса основным и вспомогательным оборудованием, режущим, вспомогательным и мерительным инструментом;

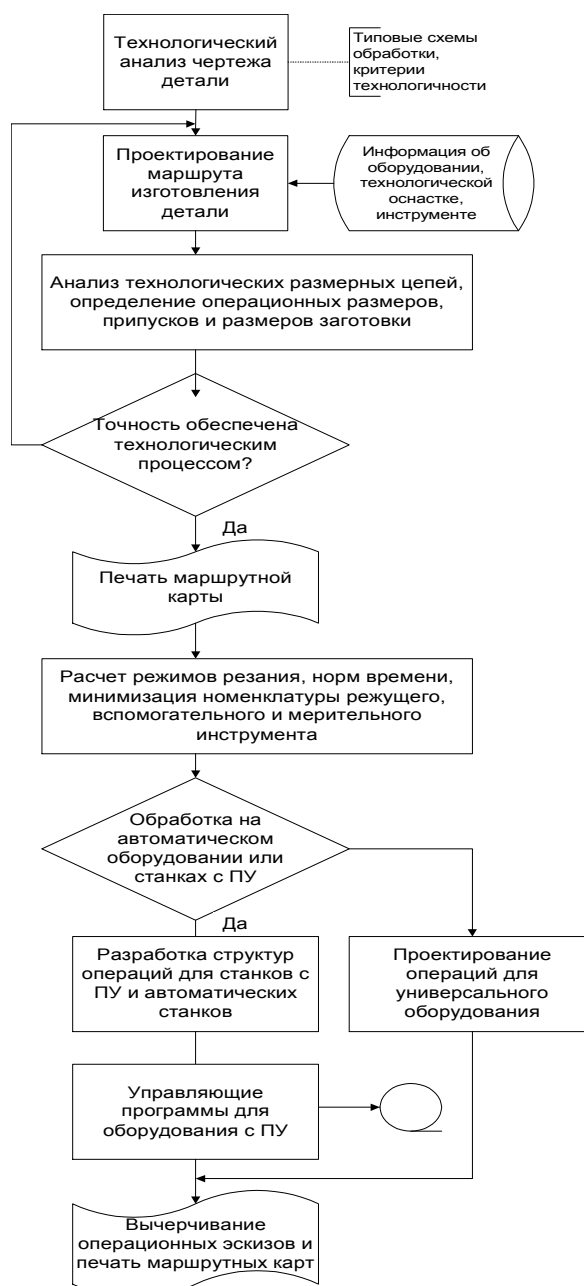


Рис. 12. Функциональная схема САПР ТП

- формирование инструментальных наладок и составление расчетно-технологических карт для операций, на которых используется оборудование с программным управлением;
- техническое нормирование технологического процесса;
- сравнение вариантов обработки по экономическим показателям и выбор оптимального решения;
- генерацию управляющих программ для станков с ПУ;
- печать технологической документации.

Нормативно-справочная информация, оформленная в виде таблиц, содержащих текстовую и числовую информацию, используется на всех этапах технологического проектирования даже при традиционной форме предпроеизводственной подготовки. В текстовой форме представляются документы, составляющие ЕСТД [30, 31, 32, 33, 34, 86]. Содержание этих документов может быть преобразовано в совокупность реляционных баз данных. Такая структура справочной информации позволяет формализовать процесс технологического проектирования, поскольку алгоритмы решения многих технологических задач могут быть описаны в виде логических отношений между элементами информации.

Определенную сложность представляет процесс преобразования графической исходной информации в текстовую, доступную для обработки в реляционных информационных системах. Однако существуют программные средства и алгоритмы представления графической информации в символьном виде. Одним из способов обработки такой информации является, например, конструкторско-технологическое кодирование [49, 50, 51, 89, 104, 105]. Современные средства и методы обработки информации позволяют сгенерировать конструкторскую документацию по текстовому описанию изделия. Обратная задача – составить словесное описание по электронному чертежу детали – представляется более сложной: ее решение существенно зависит от применяемых программных средств автоматизированного проектирования.

В то же время, в инженерном проектировании, широко используются информационные системы, позволяющие хранить, наряду с текстовой и числовой информацией, данные, представленные в векторно-графическом виде. К подобным системам можно отнести, например, R-base из графического пакета AutoCAD или DiaCad, входящий в состав инструментального комплекса СПРУТ.

Применение автоматизированных систем на различных уровнях конструкторско-технологического проектирования можно пояснить следующей схемой (рис. 13). Здесь понятию «двумерные» соответствуют системы класса AutoCAD, CorelDraw!, DiaCad.

Электронные модели объектов производства представлены интегрированными системами документооборота уровня Lotus Notes, R-base + AutoCAD, СПРУТ. EPD (рис. 14) поддерживается интегрированными САПР типа Euclid, Pro Engineer, Cadds.

При построении САПР технологического назначения основным видом программного обеспечения являются программные средства обработки информации, содержащейся в базах данных преимущественно текстового и числового вида. При этом логическая схема программно-информационного обеспечения технологической САПР (рис. 15) может быть представлена в виде сетевой структуры. Основу системы составляет реляционная СУБД, управляющая информацией, сгруппированной в самостоятельные базы данных по определенным классификационным признакам. К числу таких баз данных относятся наборы информации, условно названные:



Рис. 13. Применимость информационных систем на различных уровнях проектирования

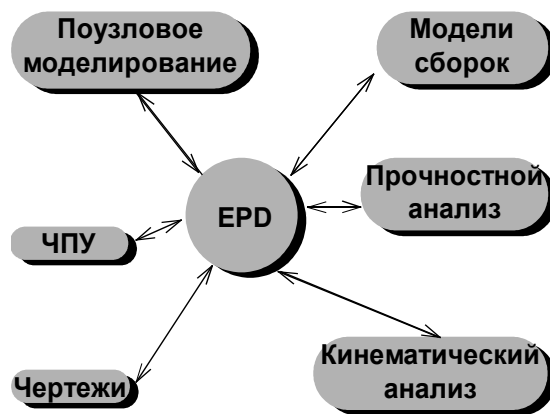


Рис. 14. Полная информационная модель изделия

«Конструкционные материалы»;

«Инструментальные материалы»;

«Методы обработки и типовые технологии»;

«Расчетные процедуры» – в этом наборе описаны, с использованием проблемно ориентированного языка, правила выполнения проектных расчетов;

«Формы выходных документов» и другие базы данных.

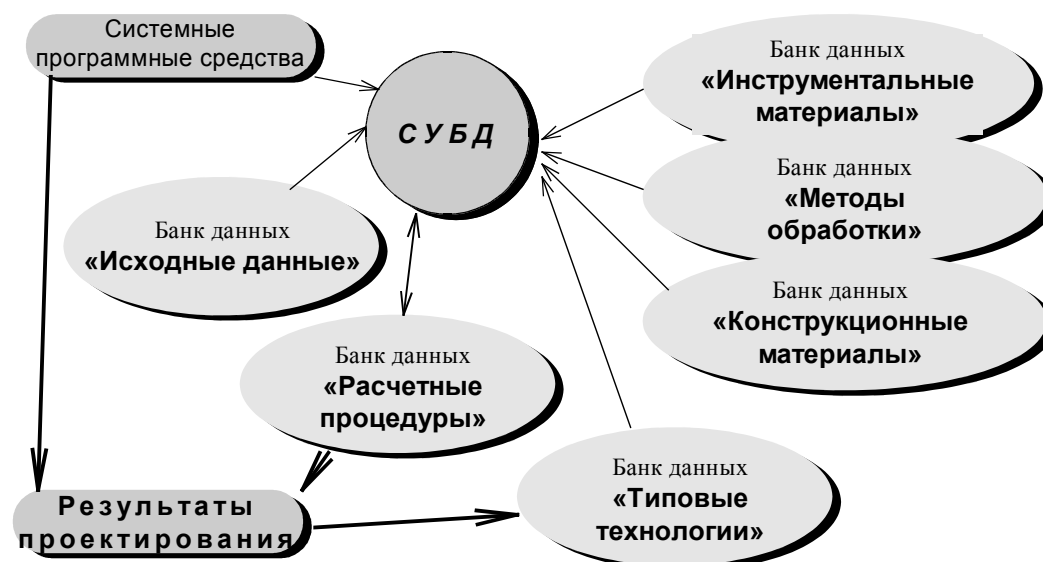


Рис. 15. Программно - информационное обеспечение САПР ТП

Взаимодействие элементов информации в процессе проектирования регламентировано методическими и организационными [30, 31] материалами. Проблемно-ориентированный язык, относящийся к классу интерпретаторов, позволяет описывать расчетные процедуры, ход проектирования и обращения к базам данных текстового и графического форматов – то есть является одновременно языком программирования высокого уровня и языком манипуляции данными. В качестве языка описания данных могут быть использованы нормативные материалы [23, 32, 34, 86], составляющие ЕСТД. Результаты проектирования представляются в виде стандартных форм на бумажных носителях и могут быть внесены в соответствующие базы данных.

Таким образом, САПР ТП, построенная на основе гибридной (текстово-графической) информационно-справочной системы, является системой открытого



типа и позволяет реализовывать как традиционные методы технологического проектирования, так и может быть дополнена современной информацией.

### 1.5. Алгебраические структуры дискретной математики

Сформулируем предположение: «Процесс формирования изделия можно представить как последовательность «перемещений» изделия в-целом или отдельных его элементов в некотором виртуальном пространстве от начальной точки (заготовка с набором свойств, определяемых способами получения) до конечной точки маршрута (готовое изделие с набором свойств, заданных в конструкторской документации). Базис виртуального пространства определяется требуемыми свойствами изделия в целом или каждого из его элементов». Опираясь на это предположение, можно использовать для моделирования технологии методы и средства, разработанные для решения «транспортных» задач. Определение «транспортной» задачи мы дадим ниже, после того, как сформулируем все необходимые понятия из области дискретной математики.

**Графом**  $G = (V, X)$  называется [76, 91, 111, 112] пара двух конечных множеств: множества точек  $V$  и множества линий  $X$ , соединяющих некоторые пары точек из множества  $V$ .

Понятие «граф» впервые введено в 1936 г. венгерским математиком Кёнигом.

Графическое представление отношения множеств  $V$  и  $X$  принято называть **диаграммой графа** или, для упрощения, **графом**.

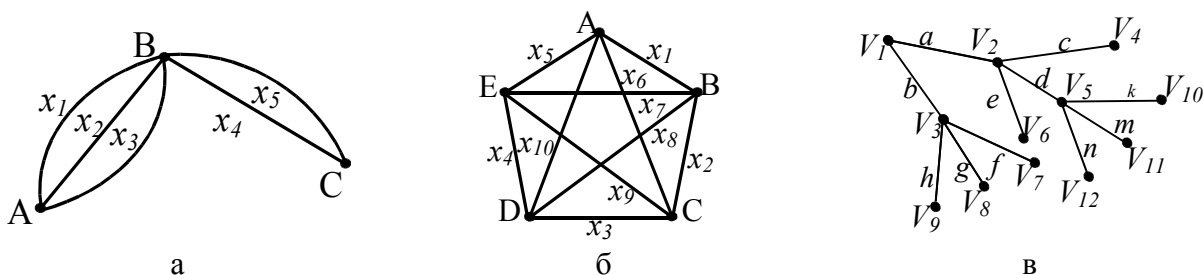


Рис. 16. Графы: а – с кратными ребрами; б – полный; в – дерево

Точки (элементы множества  $V$ ) называются **вершинами**, или узлами, графа, и обозначаются, как правило, заглавными буквами латинского алфавита (рис. 16, а...в). Иногда вершины графа нумеруют (рис. 16, в).

Линии (элементы множества  $X$ ) называют **ребрами** графа и обозначают

строчными буквами латинского алфавита, нумерованными (см. рис. 16, а, б) или без номера (см. рис. 16, в).

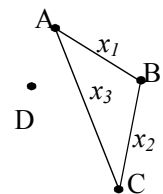
Вершины графа различаются в зависимости от количества ребер, соединяющих рассматриваемую вершину с другими вершинами графа.

Количество ребер, соединяющих рассматриваемую вершину ( $V_i$ ) с другими вершинами графа (ребер, инцидентных вершине), называют *степенью* (валентностью) вершины и обозначают  $\deg(V_i)$ .

Например, для графа, показанного на рис. 16, а:  $\deg(A)=3$ ,  $\deg(B)=5$  и  $\deg(C)=2$ . Для графа (рис. 16, б) степени всех его вершин равны:  $\deg(A)=\deg(B)=\deg(C)=\deg(D)=\deg(E)=4$ .

*Изолированной* называют вершину, степень которой равна нулю:

$$\deg(D)=0$$



*Висячей* называется вершина, степень которой равна единице:

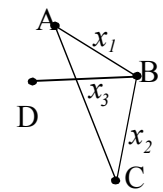
$$\deg(D)=1$$

*Нечетной* называют вершину, степень которой выражается нечетным числом:

$$\deg(B)=1, \deg(D)=1$$

*Четной* называют вершину, степень которой выражается четным числом:

$$\deg(A)=2, \deg(C)=2$$



В теории графов доказаны следующие теоремы о степенях вершин графа.

*Количество нечетных вершин* любого графа выражается четным числом.

Например, для графов, показанных на рис. 16:

на рис. 16, а) две нечетные вершины (A и C);

на рис. 16, б) нечетных вершин нет (нуль – четное число);

на рис. 16, в) восемь нечетных вершин ( $V_4, V_6 \dots V_{12}$ ).

*Сумма степеней* всех вершин графа выражается четным числом, равным удвоенному количеству ребер графа.

Например, для графов, показанных на рис. 16:

на рис. 16, а)  $\deg(A)+\deg(B)+\deg(C)=3+5+2=10=2 \cdot 5$ ;

на рис. 16, б)  $\deg(A)+\deg(B)+\deg(C)+\deg(D)+\deg(E)=5 \cdot 4=20=2 \cdot 10$ ;

на рис. 16, в)  $\sum_{i=1}^{12} \deg(V_i) = 2 + 2 \cdot 4 + 5 \cdot 1 + 4 + 3 \cdot 1 = 22 = 2 \cdot 11$ .

**Кратными** или параллельными называют ребра в том случае, когда они соединяют вершины из одной и той же пары.

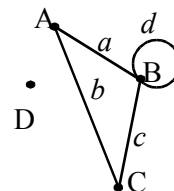
На диаграмме графа (рис. 16, а) кратными являются ребра  $x_1 \dots x_3$ , которые соединяют вершины  $A$  и  $B$  и ребра  $x_4 \dots x_5$  – соединяют вершины  $B$  и  $C$ . На графах, показанных на рис. 16, б, в) кратных ребер нет.

Количество кратных ребер для одной пары вершин называют *кратностью* ребра.

На диаграмме (рис. 16, а) ребро  $(A, B)$  имеет кратность, равную 3, ребро  $(B, C)$  – кратность 2.

**Петлей** называют ребро, начало и конец которого совпадают.

Например, ребро  $d(B, B)$  является петлей.



Ребра ориентированных графов называют *дугами*.

**Маршрутом** в неориентированном графе называют такую последовательность ребер, в которой начало каждого следующего ребра совпадает с концом предыдущего.

Маршрут, как правило, записывают в виде последовательности ребер. Поскольку длина каждого ребра простого графа равна единице, можно считать, что количество ребер графа в маршруте совпадает с суммарной длиной этих ребер.

**Длина** маршрута – количество ребер, соединяющих начальную и конечную вершины маршрута.

Маршрут может быть замкнутым, если начальная вершина маршрута совпадает с его конечной вершиной, или незамкнутым. Кроме того, в списке ребер и (или) вершин маршрута могут встречаться повторяющиеся элементы. Для каждого из таких частных случаев предусмотрены собственные понятия.

**Цепь** – маршрут, в котором все ребра попарно различны.

Например, цепями являются следующие (рис. 16, б) маршруты:  $D - (x_4, x_5, x_1, x_2) - C$ ;  $D - (x_4, x_5, x_1, x_6, x_9) - C$ ,  $D - (x_{10}, x_1, x_2) - C$ ;  $D - (x_{10}, x_8) - C$ . Маршрут  $D - (x_4, x_5, x_1, x_6, x_5, x_8) - C$  не является цепью, поскольку в списке ребер повторяется ребро  $x_5$ .

Цепь, в которой все вершины попарно различны, называется *простой цепью*.

Цепи  $D - (x_4, x_5, x_1, x_2) - C$ ;  $D - (x_{10}, x_1, x_2) - C$ ;  $D - (x_{10}, x_8) - C$  из предыдущего (рис. 16, б) примера простые, а цепь  $D - (x_4, x_5, x_1, x_6, x_9) - C$  не является простой, так как дважды проходит через вершину  $E$ .

Циклом называют замкнутую цепь. *Простым циклом* называют цикл, в котором ни одна из вершин, кроме начальной и конечной, не встречается более одного раза.

Например, замкнутые цепи (рис. 16, б)  $D - (x_4, x_5, x_1, x_6, x_9, x_3) - D$ ,  $D - (x_4, x_5, x_1, x_2, x_3) - D$ ;  $D - (x_{10}, x_8, x_3) - D$ ,  $D - (x_{10}, x_1, x_2, x_3) - D$  являются циклами. Из них цикл  $D - (x_4, x_5, x_1, x_6, x_9, x_3) - D$  не является простым циклом. Доказано [76] утверждение о циклических подстановках: в качестве начала (и, соответственно, конца) цикла можно использовать любую из составляющих цикл вершин.

Если между двумя любыми вершинами графа существует маршрут, то говорят, что граф является *связным*.

В качестве возможного примера несвязного графа можно назвать граф с изолированной вершиной. Оценивая связность графа, вводят некоторые количественные меры связности, например [76], определяют минимальное количество вершин или ребер, которые необходимо удалить из связного графа, чтобы он стал несвязным. Поясним на примерах.

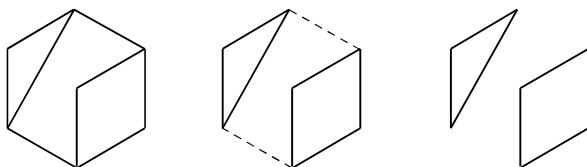
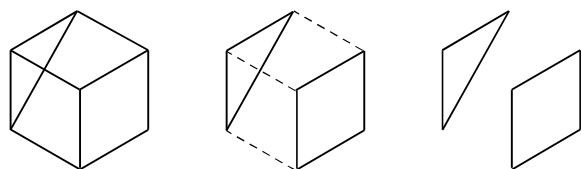


Рис. 17. Преобразование связного графа в несвязный (удаляемые ребра отмечены штрихами)

Последовательное удаление двух ребер приводит к преобразованию исходного связного графа в два графа, не имеющих ни одной общей вершины.

Если рассматривать два полученных многоугольника, как элементы, составляющие один граф, то следует признать, что не для любых двух вершин может быть выполнено отношение связности, т. е. граф, полученный в результате преобразования, является несвязным. Исходный граф называют двухсвязным, поскольку минимальное количество ребер, которые нужно удалить для получения несвязного графа равно двум.



**Рис. 18. Преобразование связного графа в несвязный (удаляемые ребра отмечены штрихами)**

Добавление к исходному графу еще одного ребра превращает его в трехсвязный, поскольку минимальное количество удаляемых ребер теперь равно трем.

Каждая из фигур, полученных в результате преобразования графа в несвязный, представляет собой самостоятельный связный граф и называется *компонентой связности*.

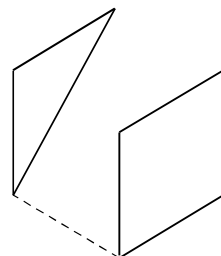
Можно утверждать, что связный граф всегда включает только одну компоненту связности. Тогда процесс преобразования графа в несвязный можно рассматривать как процесс увеличения числа компонент связности.

Различают *вершинную связность*, когда для увеличения числа компонент связности необходимо удалить некоторое количество вершин. В рассмотренных выше (рис. 17, 18) примерах показана *реберная связность* графа.

Применительно к понятиям связности графа вводят следующие определения для вершин и ребер.

*Мостом* называют ребро, удаление которого приводит к увеличению числа компонент связности.

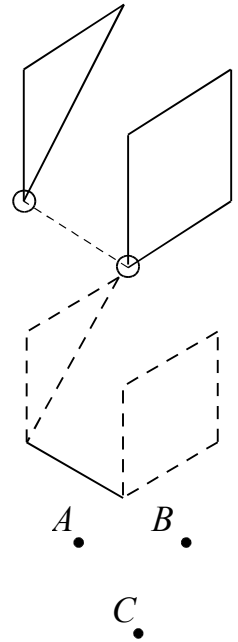
На рисунке справа мост выделен пунктирной линией. В данном случае, это единственное ребро, удаление которого приведет к разбиению графа на две компоненты связности.



Можно утверждать, что ребро графа является мостом тогда и только тогда, когда оно не принадлежит ни одному циклу.

Точкой сочленения называют вершину графа, удаление которой приводит к увеличению числа компонент связности.

На рисунке справа выделены две точки сочленения. Следует заметить, что концы моста *всегда* являются точками сочленения.



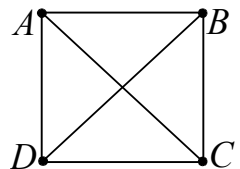
Связный граф (подграф), не содержащий точки сочленения называют *блоком*

На рисунке справа блоки выделены пунктирными линиями.

Нуль-графом называют граф, состоящий только из изолированных вершин.

Иначе говоря, множество ребер нуль-графа является пустым.

Граф называется *полным*, если любые две его различные вершины соединены одним и только одним ребром.



Очевидно, что количество и расположение ребер полного графа однозначно определяется количеством его вершин. Пусть число вершин полного графа  $n$ , а количество ребер  $m$ . Тогда, поскольку каждая вершина полного графа соединяется ребрами со всеми остальными вершинами, степень любой вершины равна  $\deg(V_i) = n - 1$ . Можно определить количество ребер полного графа:

$$m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \deg(V_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (n-1) = \frac{n \cdot (n-1)}{2}, \quad (1)$$

Дополнением (рис. 19) графа  $G_0(V, X)$  называется граф  $G_1(V, X)$  с теми же вершинами  $V$ , что и граф  $G_0$ , но имеющий те и только те ребра  $X'$ , которые необходимо добавить к графу  $G_0$ , чтобы он стал полным.

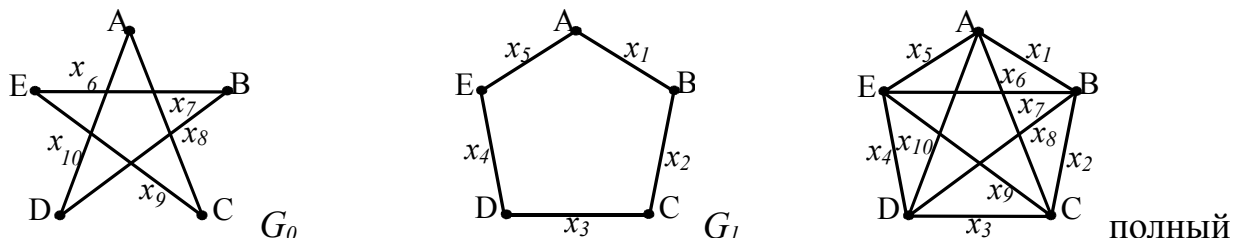


Рис. 19. Дополнение графа до полного

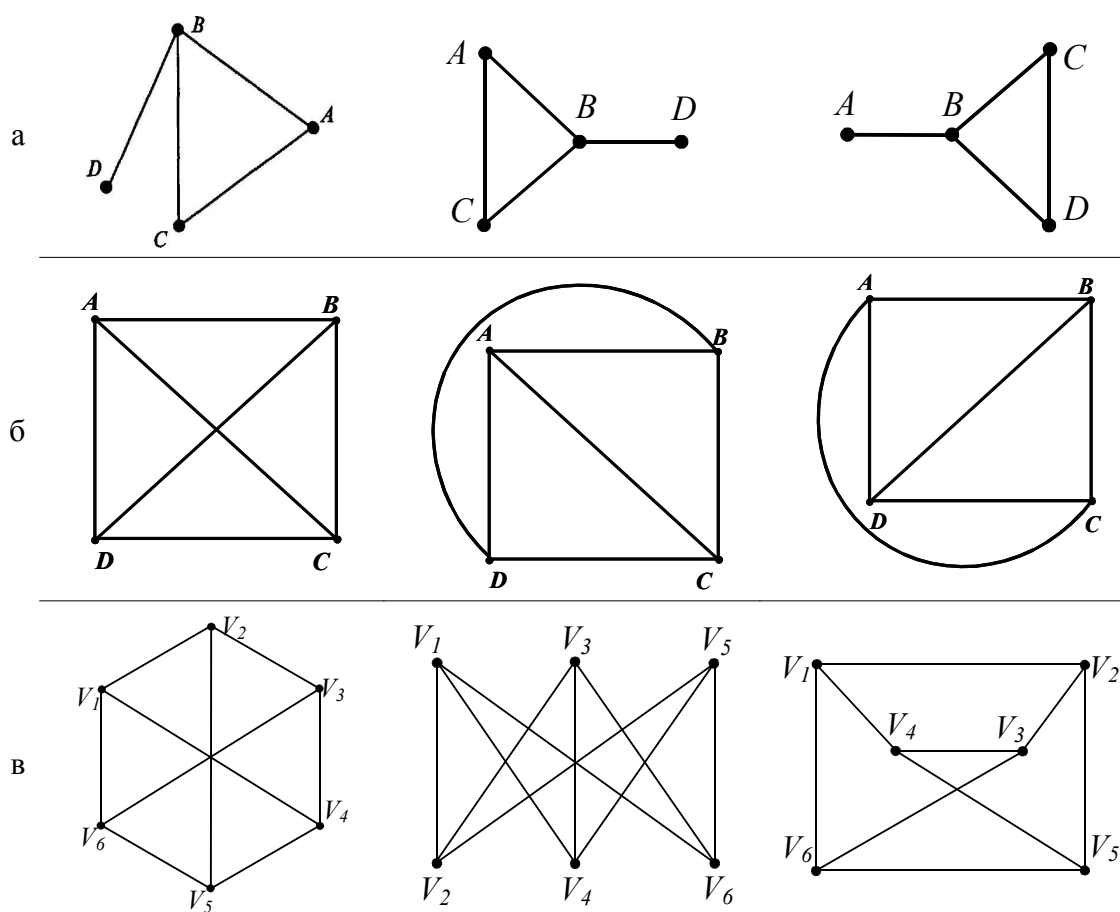
Из определений полного графа и дополнения следует:

- 1) полный граф содержит ребра только с кратностью, равной единице;
- 2) граф с кратными ребрами не может иметь дополнения;
- 3) дополнением полного графа можно считать нуль-граф и наоборот.

*Простым* графом называют граф без петель и кратных ребер.

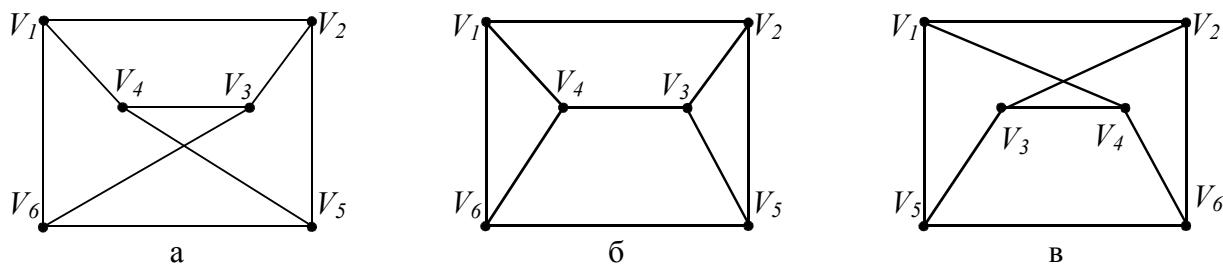
*Изоморфными* называют графы, для которых существует взаимнооднозначное соответствие между их ребрами и вершинами, причем соответствующие вершины соединяются соответствующими ребрами.

Проще говоря, изоморфными можно считать графы, для которых можно построить различные диаграммы, сохранив, при этом, соответствие между номерами (именами) вершин и номерами (именами) ребер. На рис. 20 представлены примеры изоморфных графов. Можно говорить о сохранении изоморфизма (подобия), если существует возможность так переименовать вершины графа, чтобы восстановилось первоначальное соответствие (рис. 20, а).



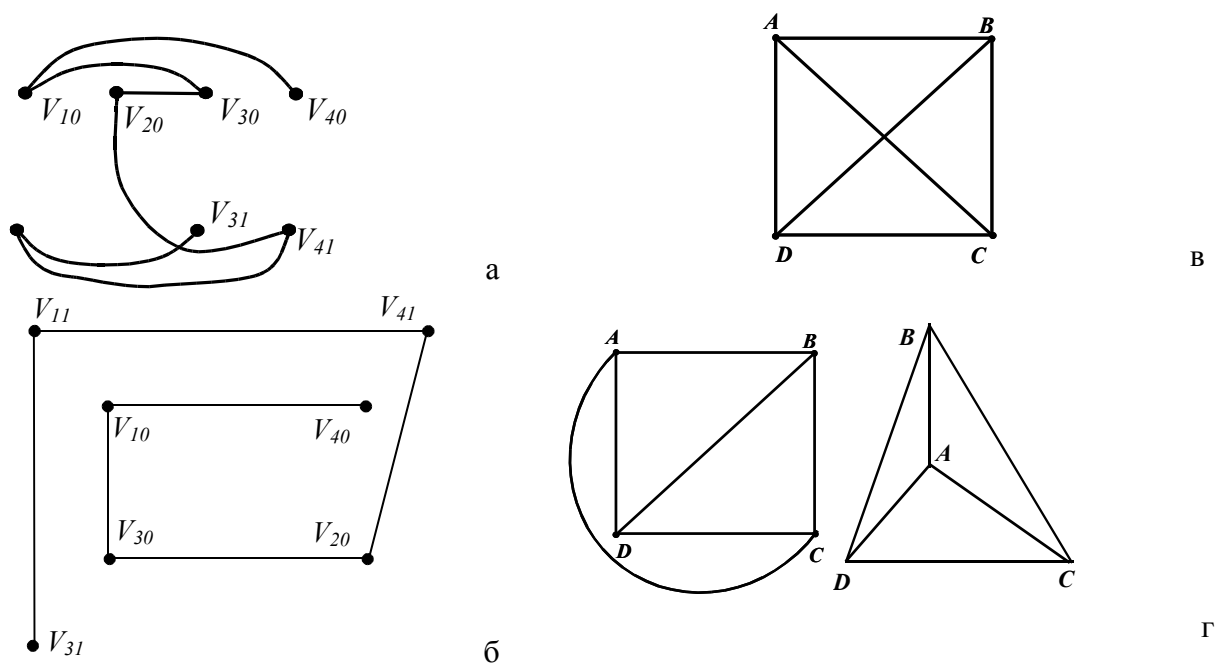
**Рис. 20. Примеры диаграмм изоморфных графов**

Если же сохранить первоначальное соответствие не удастся, то следует говорить о неизоморфных графах, даже если диаграммы этих графов подобны.



**Рис. 21. Пример диаграммы неизоморфного графа**

Например, диаграммы (рис. 15, в и рис. 16, а, в) представляют изоморфные графы. В то же время граф (рис. 16, б) не является изоморфным графам, представленным на рис. 16, а, в. Рассмотрение отношений между вершинами и ребрами графа обычно выполняется с точностью до изоморфизма, т. е. рассуждения и расчеты, выполненные для графа, справедливы и для всех графов, изоморфных ему.



**Рис. 22. Примеры диаграмм изоморфных графов с пересекающимися ребрами**

Необходимость построения изоморфных графов определяется в тех случаях, когда диаграмма графа оказывается неудобной для рассмотрения (рис. 22, а, в) и, в частности, когда на диаграмме имеются ребра, пересекающиеся не в вершинах графа. Анализ структуры графа удобно проводить по диаграмме, на которой ребра пересекаются только в вершинах. На рис. 22, а, б и 22, в, г приведены диаграммы



попарно соответственных изоморфных графов. Нетрудно заметить, что изоморфизм не изменяет степени вершин графа.

Графы, диаграммы которых могут быть изображены на плоскости так, чтобы смежные ребра пересекались только в вершинах, называют *планарными* графами.

Для планарных графов справедливо соотношение между количеством вершин ( $n$ ) и ребер ( $m$ ), определяемое формулой Эйлера:

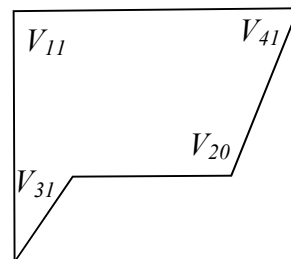
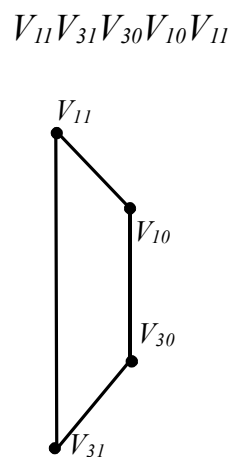
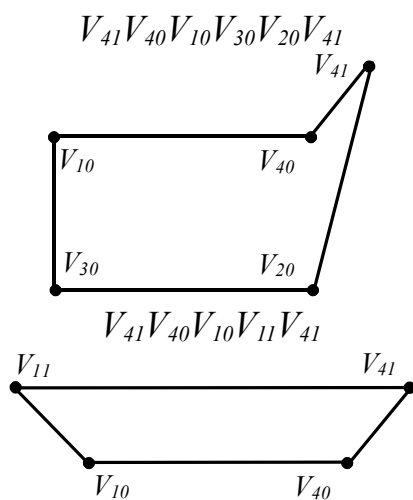
$$n - m + f = 2 . \quad (2)$$

Величина  $f$  называется *количеством граней графа*.

Для определения значения  $f$  необходимо сформулировать понятие грани.

*Гранью графа* называют часть плоскости, заключенную между ребрами графа и не содержащую внутри себя ни вершин, ни ребер. Одна из граней обязательно является внешней. Грани, разделенные ребрами, называются *смежными*.

Например, для графа, представленного диаграммой на рис. 22, б, внутренними гранями являются многоугольники:



Внешней гранью следует считать плоскую область, лежащую вне многоугольника  $V_{41}V_{11}V_{31}V_{30}V_{20}V_{41}$

Таким образом, для графа (рис. 22, а, б) количество граней  $f = 4$  и соотношение (2) является справедливым:  $n - m + f = 7 - 9 + 4 = 2$ . Аналогичные рассуждения для графа (рис. 22, в, г) подтверждают справедливость формулы Эйлера:  $n - m + f = 4 - 6 + 4 = 2$ .

Соотношение (2) можно использовать для проверки планарности графа. Например, для графа (рис. 21, а) данное соотношение выглядит следующим образом:  $n - m + f = 6 - 9 + 6 = 3$ , «Внутренние» ребра графа разбивают плоскость на 5 частей (рис. 23), не содержащих внутри себя вершин и ребер и, кроме того, добавляется внешняя, шестая, грань.

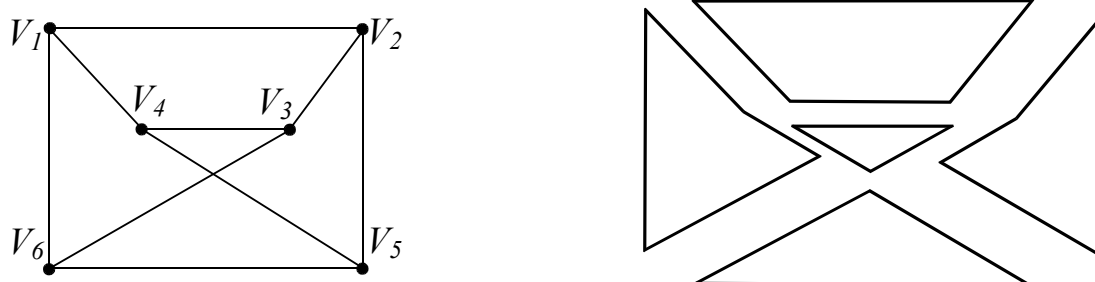


Рис. 23. Внутренние грани.

Следует признать, что граф (рис. 21, а) и все изоморфные ему графы (рис. 20, в, рис. 21, в) не являются планарными.

Граф, для которого помимо двух множеств – вершин и ребер – задано еще и направление ребер, называют *ориентированным* графом или *орграфом*.

В случае ориентированного графа, ребра на диаграмме показывают со стрелками, определяющими направление ребра. Соответственно, для элементов ориентированного графа установлены другие названия.

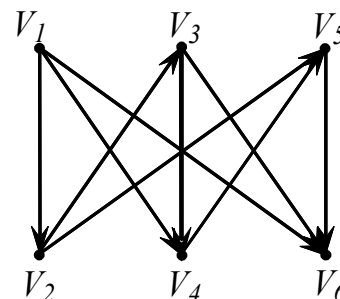
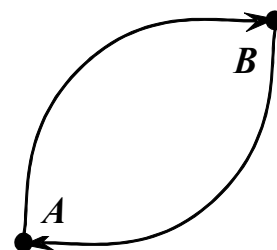


Рис. 24. Ориентированный граф

Ребро ориентированного графа называют *дугой*. Для дуги определяют понятия: *начало* (вершина, из которой дуга выходит); и *конец* (вершина, в которую дуга входит). Конец дуги на диаграмме графа отмечают стрелкой.

Поскольку каждая дуга графа определяется фиксированными началом и концом, то следует признать, что разнонаправленные дуги, соединяющие одинаковые вершины, являются различными, причем некратными, дугами. Например, дуга АВ (верхняя) и дуга ВА (нижняя).



Понятие *степени вершины* также распадается на два самостоятельных понятия – *степень входа* и *степень выхода*.

*Степенью входа* вершины  $V_i$  –  $\deg^+(V_i)$  – называют количество дуг, для которых эта вершина является концом.

*Степенью выхода* вершины  $V_i$  –  $\deg^-(V_i)$  – называют количество дуг, исходящих из вершины.

Например, для графа, показанного на рис. 24, степени входа и выхода вершин определяются следующим образом:

$$\begin{array}{cccccc} \deg^+(V_1)=0 & \deg^+(V_2)=1 & \deg^+(V_3)=1 & \deg^+(V_4)=2 & \deg^+(V_5)=2 & \deg^+(V_6)=3 \\ \deg^-(V_1)=3 & \deg^-(V_2)=2 & \deg^-(V_3)=2 & \deg^-(V_4)=1 & \deg^-(V_5)=1 & \deg^-(V_6)=0 \end{array}$$

В орграфе маршрут является ориентированным и называется «*путь*». При этом должно быть обеспечено выполнение двух обязательных требований: направление каждой дуги должно совпадать с направлением маршрута; ни одно ребро пути не должно встречаться дважды.

Другими словами, *путь* – упорядоченная последовательность дуг ориентированного графа, в которой конец предыдущей дуги совпадает с началом следующей и все дуги единственны.

Аналогичным образом можно определить понятие цикла.

*Цикл* в орграфе – путь, у которого совпадают начало и конец.

Для ориентированного графа, так же как и для неориентированного, справедливо утверждение о циклических подстановках.

*Эйлеровым циклом* графа называется цикл, который содержит все ребра графа только один раз. Граф, обладающий эйлеровым циклом, называется *эйлеровым графом* [62, 63, 76].

Говорят, что плоские эйлеровы графы можно изобразить «одним росчерком пера», причем процесс изображения начинается и заканчивается в одной вершине. Примеры эйлерова графа с выделенными эйлеровыми циклами показаны на рис. 25.

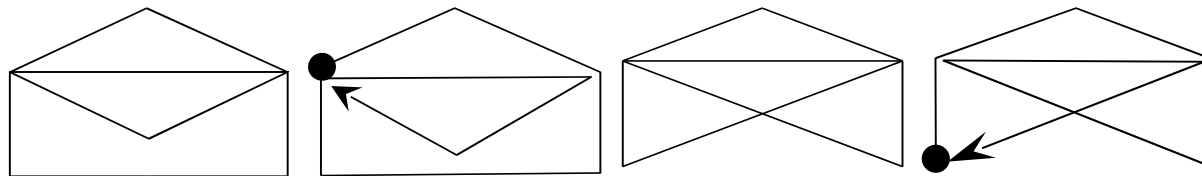


Рис. 25. Эйлеровы циклы в планарных графах

Название эйлеровым циклам и графам дано по фамилии русского математика Леонарда Эйлера (XVIII в.), впервые применившего понятие цикла для решения прикладной инженерной задачи – так называемой «Задачи о мостах». Приведем здесь условие задачи и чертеж для ее решения.

Эйлер доказал, что задача не имеет решения. Читателю предлагается самостоятельно проверить справедливость теоремы Эйлера:

«Связный граф является эйлеровым тогда и только тогда, когда все его вершины четные».

Далее будет показано, каким образом понятие эйлеровых путей может найти применение в задачах технологического проектирования, в частности в задачах расчета размерных цепей.

Гамильтоновым путем плоского связного графа называется путь, проходящий через каждую вершину только один раз. Граф, содержащий такой путь, называется *полугамильтоновым графом*.

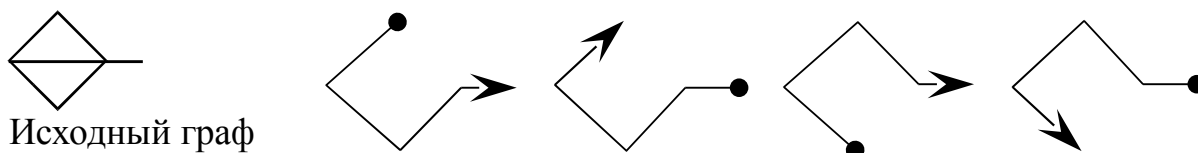


Рис. 26. Гамильтоновы пути в планарном графе

Так, например, на рис. 26 показаны все возможные гамильтоновы пути для связного планарного графа. Любой другой путь не будет являться гамильтоновым, поскольку пройдет неоднократно, или не пройдет вообще, через какие-либо вершины.

Начальная (она же конечная) вершина гамильтонова цикла (рис. 27) встречается в цикле дважды. Все остальные вершины могут встретиться только один раз.

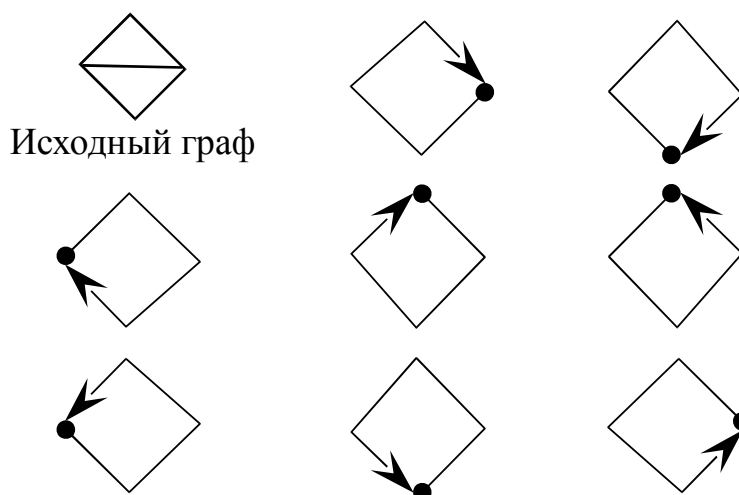


Рис. 27. Гамильтоновы циклы в планарном графе

Если гамильтонов путь может быть начат и закончен в одной и той же вершине, то говорят о *гамильтоновом цикле* и, соответственно, о *гамильтоновом графе*.

Очевидно, что граф с мостом не может быть гамильтоновым.

Проблема поиска путей и циклов, проходящих однократно через каждую вершину графа, была сформулирована (1859 г.) Уильямом Гамильтоном. Понятие гамильтоновых циклов может быть применено к решению, так называемой, «задачи коммивояжера» и инженерных задач, ей подобных.

До сих пор мы рассматривали графы, предполагая длины всех ребер равными единице, поскольку нас интересовало только существование (или отсутствие) связи между элементами множества вершин графа. Если предположить, что, кроме отношения смежности вершин, существует еще и количественная мера удаления одной из смежных вершин от другой, то мы придем к понятию взвешенного графа. Определим следующие понятия.

*Вес ребра* – расстояние между двумя смежными вершинами графа. Аналогом этого понятия можно считать *длину ребра*.

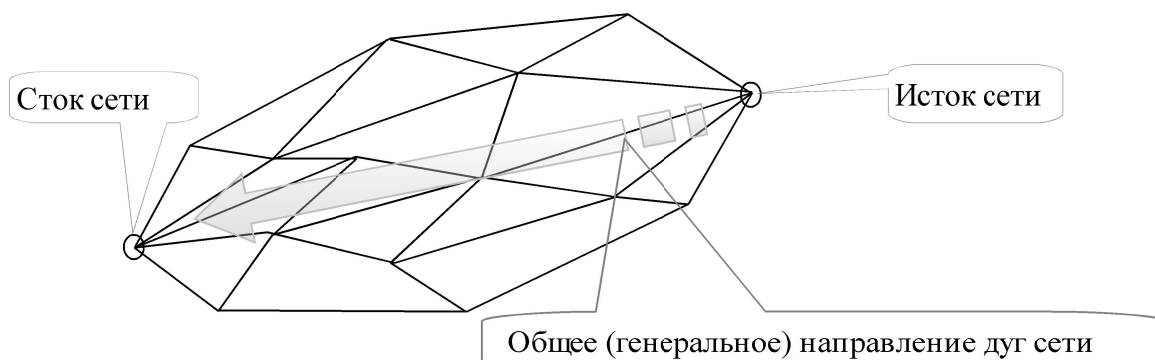
Вес ребра может измеряться различными физическими величинами, в зависимости от постановки прикладной задачи.

*Взвешенный граф* – граф, в котором учитываются веса ребер.

*Сеть* – ориентированный взвешенный граф.

Понятие «сеть» лежит в основе математических постановок целого класса задач теории графов и, в частности, уже названной, «задачи коммивояжера».

Частным случаем сети является структура (рис. 28) с единственной исходной и единственной конечной вершинами – так называемая *транспортная сеть*. Исходную вершину ( $\deg^+(V_i)=0$ ) называют *исток*ом, конечную ( $\deg^-(V_i)=0$ ) – *стоком* транспортной сети.



**Рис. 28.** Общий вид транспортной сети  
(для упрощения рисунка стрелки на каждой дуге сети не показаны)

Определить граф – означает задать соответствие (по возможности однозначное) между элементами двух множеств: вершин и ребер. В случае определения ориентированного или взвешенного графа дополнительно необходимо определить и эти свойства.

Диаграммой называют чертеж, на котором показаны все элементы множеств вершин и ребер графа. Ребра обычно показываются непрерывными линиями. Однако, в тех случаях, когда требуется особо выделить некоторые элементы графа, допускается использование дополнительных условных обозначений. При вычерчивании диаграммы рекомендуется избегать пересечения ребер не в вершинах. Если это невозможно – граф не планарный – необходимо отличать вершины (например, выделяя точками) от пересечений. Иногда, наряду с понятием «диаграмма», используют также термины «реализация», «граф-рисунок», «графическое представление».

Примеры диаграмм представлены на рис. 16...29. В зависимости от структуры графа и сложности решаемых задач на диаграмме отмечают:

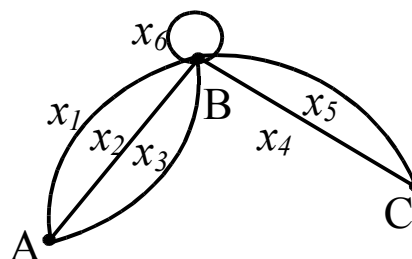
- нумерованные обозначения или названия вершин;

- нумерованные обозначения или названия ребер;
- направление каждой дуги ориентированного графа;
- вес каждого ребра или дуги сети;
- пропускную способность (максимальную пропускную способность) дуги транспортной сети.

Следует заметить, что диаграмма является наиболее наглядным представлением логической структуры графа. Для того, чтобы наглядность диаграммы не ухудшалась при использовании нестандартных условных обозначений, рекомендуется оговаривать правила применения для каждого условного обозначения. Вместе с тем, очевидно, что для алгоритмического решения математической задачи диаграмма, как способ формализованного представления исходных данных, подходит в наименьшей степени.

Наиболее общим способом представления графа является перечень вершин и ребер. Например, для графа, показанного на рис. 29, список вершин и ребер может выглядеть следующим образом:

№	Вершины		Ребра
1	A	B	$x_1$
2	A	B	$x_2$
3	A	B	$x_3$
4	B	B	$x_6$
5	B	C	$x_4$
6	B	C	$x_5$



**Рис. 29. Диаграмма неориентированного графа с петлями и кратными ребрами**

К недостаткам этого способа представления данных следует отнести: громоздкость – для каждого ребра необходимо отмечать соответствующие ему вершины – и необходимость дублирования данных в случае описания кратных ребер. Однако, список вершин и ребер достаточно часто используется при автоматизированном решении задач, поскольку в различных языках программирования существуют средства описания подобных структур, например, кортежи или записи (Record).

Наиболее часто для определения соответствия между элементами множеств вершин и ребер используют табличные (матричные) способы задания отношений.

Говорят, что две вершины графа являются *смежными*, если существует ребро, соединяющее эти вершины.

Достаточно полное описание отношений между вершинами можно создать в виде, так называемой, *матрицы смежности*, которая строится по следующим общепринятым правилам:

- количество строк и столбцов матрицы смежности равно количеству вершин графа, включая висячие и изолированные;
- обозначения строк и столбцов совпадают с обозначениями (или номерами) вершин;

- значение элемента матрицы на пересечении строки и столбца, соответствующих смежным вершинам, равно единице;

- значение элемента матрицы на пересечении строки и столбца, соответствующих несмежным вершинам, равно нулю;

- если в вершине графа нет петли, то соответствующий элемент матрицы равен нулю (хотя, формально, каждая вершина графа смежна сама себе); если петля существует, то соответствующий элемент матрицы на главной диагонали равен единице;

$$x_{ij} = \begin{cases} 0; & \text{нет ребра } V_i V_j \\ 1; & \text{есть ребро } V_i V_j \end{cases}$$

$$x_{ii} = \begin{cases} 0; & \text{нет петли } V_i \\ 1; & \text{есть петля } V_i \end{cases}$$

Примеры построения матриц смежности для различных графов приведены на рис. 30...36.

		Номера вершин					
		1	2	3	4	5	6
Номера вершин	1	0	1	0	1	0	1
	2	1	0	1	0	1	0
	3	0	1	0	1	0	1
	4	1	0	1	0	1	0
	5	0	1	0	1	0	1
	6	1	0	1	0	1	0

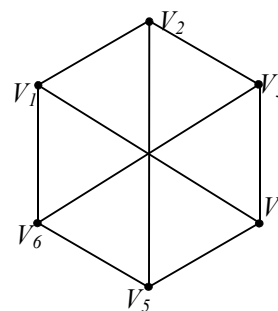


Рис. 30. Матрица смежности и диаграмма простого неориентированного графа



		Номера вершин					
		1	2	3	4	5	6
Номера вершин	1	0	1	0	1	0	1
	2	1	0	1	0	1	0
	3	0	1	1	1	0	1
	4	1	0	1	1	1	0
	5	0	1	0	1	0	1
	6	1	0	1	0	1	0

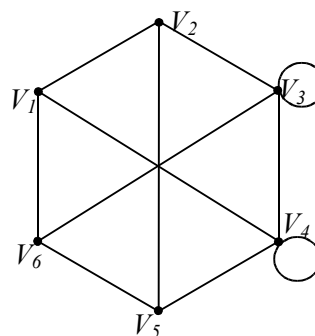
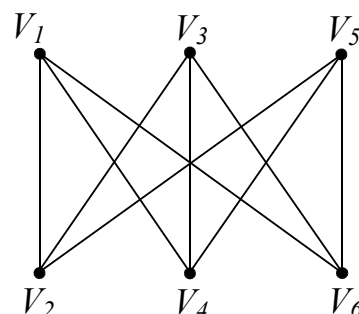
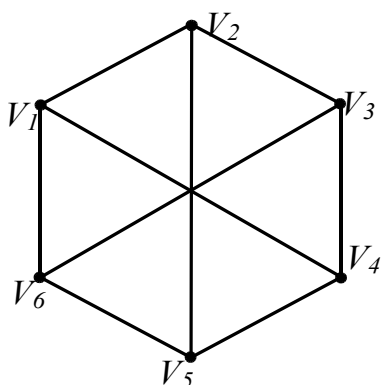


Рис. 31. Матрица смежности и диаграмма неориентированного графа с петлями

Следует отметить, что изоморфизм не изменяет (рис. 32) матрицу смежности.

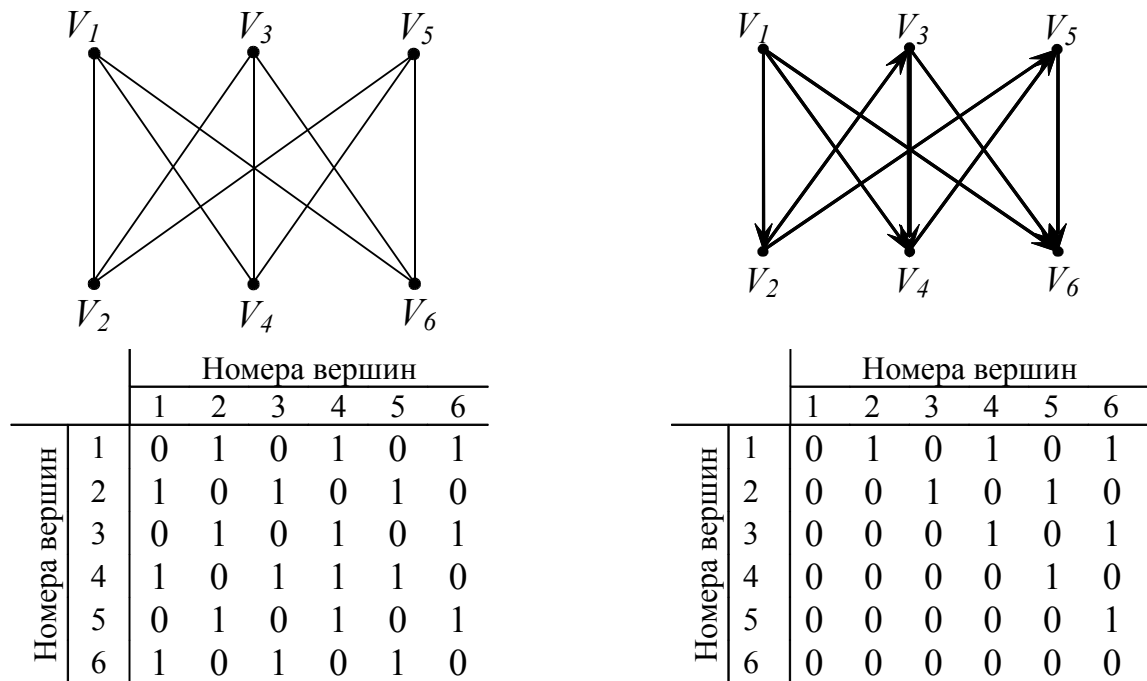
Очевидно, что для неориентированного графа матрица смежности будет симметрична относительно главной диагонали, поскольку существование ребра между некоторыми вершинами  $V_i$  и  $V_j$  означает существование ребра между вершинами  $V_j$  и  $V_i$ . В то же время, направление ребра для ориентированного графа представляет собой несимметричное отношение между смежными вершинами.



		Номера вершин					
		1	2	3	4	5	6
Номера вершин	1	0	1	0	1	0	1
	2	1	0	1	0	1	0
	3	0	1	0	1	0	1
	4	1	0	1	1	1	0
	5	0	1	0	1	0	1
	6	1	0	1	0	1	0

		Номера вершин					
		1	2	3	4	5	6
Номера вершин	1	0	1	0	1	0	1
	2	1	0	1	0	1	0
	3	0	1	0	1	0	1
	4	1	0	1	1	1	0
	5	0	1	0	1	0	1
	6	1	0	1	0	1	0

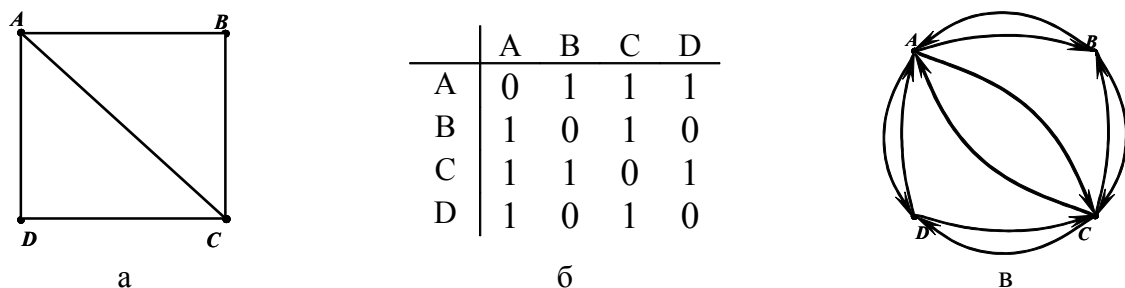
Рис. 32. Диаграммы и матрицы смежности изоморфных графов



**Рис. 33.** Диаграммы и матрицы смежности неориентированного (слева) и ориентированного (справа) графов подобной конфигурации

Матрица смежности представляет собой достаточно компактный способ представления структуры графа, который легко поддается автоматизированной обработке – типы данных, подобные матрицам или двумерным массивам, присутствуют практически во всех языках программирования.

Для того чтобы выявить недостатки данного способа определения графов, достаточно попытаться, следуя описанным выше правилам, построить матрицы смежности для графов с кратными ребрами или взвешенных графов. Следует отметить, также, что матрица смежности не позволяет однозначно (рис. 34) определить отношения между вершинами и ребрами графа.



**Рис. 34.** Неоднозначность определения графа с помощью матрицы смежности: а – простой граф; б – матрица смежности; в – ориентированный граф

Говорят, что вершина графа *инцидентна* ребру (и наоборот), если вершина является начальной или конечной точкой ребра.

Отношения между вершинами графа можно определить в виде матрицы инцидентности, которая строится по следующим правилам:

- количество строк матрицы инцидентности равно количеству вершин графа;
- количество столбцов матрицы инцидентности равно количеству ребер графа;
- обозначения строк и столбцов совпадают с обозначениями (или номерами) соответствующих вершин и ребер;

- для *неориентированного* графа:

значение элемента матрицы на пересечении строки и столбца, соответствующих инцидентным элементам, равно единице;

значение элемента матрицы на пересечении строки и столбца, соответствующих неинцидентным элементам, равно нулю;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{вершина } V_i \text{ инцидентна} \\ & \text{ребру } R_j; \\ 0; & \text{вершина } V_i \text{ неинцидентна} \\ & \text{ребру } R_j. \end{cases}$$

- для *ориентированного* графа:

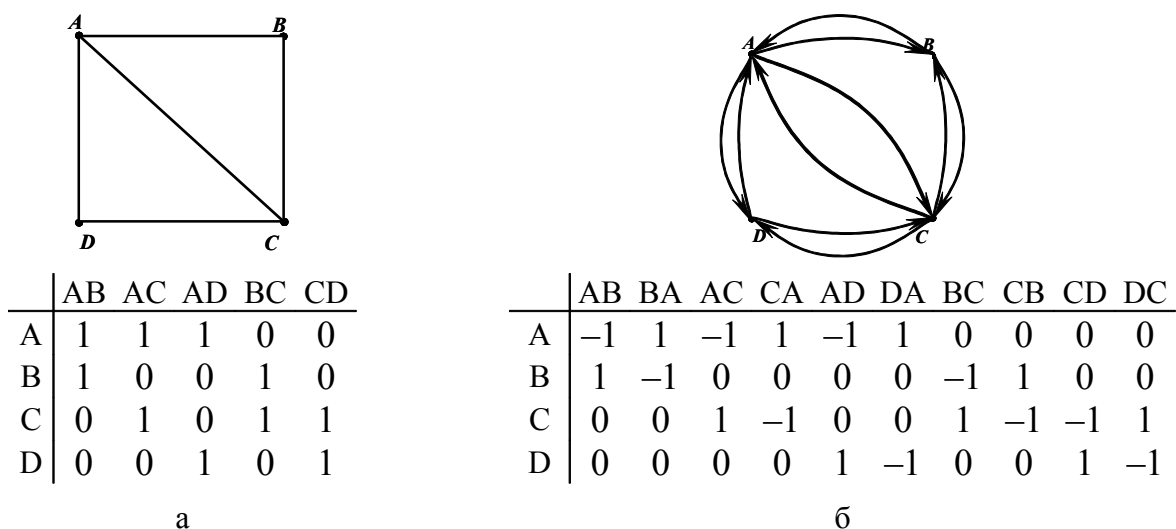
значение элемента матрицы на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца равно «– 1», если  $i$ -я вершина является начальной точкой  $j$ -го ребра;

значение элемента матрицы на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца равно единице, если  $i$ -я вершина является конечной точкой  $j$ -го ребра;

значение элемента матрицы на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца равно нулю, если  $i$ -я вершина не является инцидентной  $j$ -му ребру.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{вершина } V_i \text{ — конечная} \\ & \text{точка ребра } R_j; \\ 0; & \text{вершина } V_i \text{ неинцидентна} \\ & \text{ребру } R_j; \\ -1; & \text{вершина } V_i \text{ — начальная} \\ & \text{точка ребра } R_j. \end{cases}$$

Матрица инцидентности, построенная в соответствии с названными правилами, позволяет однозначно определить отношения между вершинами и столбцами.



**Рис. 35. Определение графа с помощью матрицы инцидентности:**

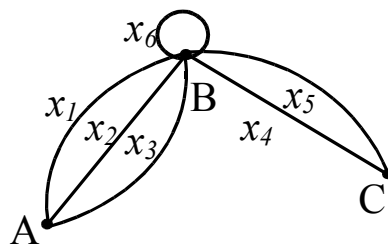
а – простой граф; б – ориентированный граф

Проверить правильность построения матрицы инцидентности можно по следующим закономерностям:

- для неориентированных графов – количество ненулевых значений в каждом столбце матрицы инцидентности и сумма этих значений равна двум;
- для ориентированных графов – количество ненулевых значений в каждом столбце матрицы инцидентности равно двум; сумма этих значений равна нулю.

Можно заметить что количество ненулевых значений в каждой строке матрицы инцидентности совпадает со степенью соответствующей вершины для неориентированных графов. Для ориентированных графов эта закономерность выглядит следующим образом: количество значений, равных единице, совпадает со степенью входа  $\deg^+(V_i)$ , а количество значений, равных  $-1$ , совпадает со степенью выхода  $\deg^-(V_i)$ .

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
A	1	1	1	0	0	0
B	1	1	1	1	1	1
C	0	0	0	1	1	0



**Рис. 36. Матрица инцидентности и диаграмма неориентированного графа с петлями и кратными ребрами**

Для определения графа с петлями и кратными ребрами необходимо предусмотреть сквозную нумерацию, или другой способ идентификации ребер, позво-

ляющий различать несовпадающие ребра, инцидентные одним и тем же вершинам.

Наличие петли нарушает закономерность, отмеченную выше, – в каждом столбце матрицы должно быть два ненулевых значения, поскольку каждое ребро инцидентно двум (точка входа и точка выхода) вершинам – петле  $x_6$  (рис. 36) инцидентна только одна вершина  $B$ .

В качестве значений в матрицах смежности и инцидентности допускаются только логические («истина» или  $\pm 1$  и «ложь» или 0) величины, определяющие наличие отношения между элементами графа. Следствием этого является невозможность использовать данные структуры для определения взвешенных графов (сетей), поскольку сеть предполагает еще и значение веса дуги (потока, максимального допустимого потока через дугу), кроме собственно наличия и направления дуги.

Алгебраической структурой, позволяющей определить свойства сети, можно считать модификацию списка вершин и ребер сети – *структурно-временную таблицу*.

Работа	Опорная работа	Вес
$a_1$	—	$t_1$
$a_2$	—	$t_2$
$a_3$	$a_1$	$t_3$
$a_4$	$a_1$	$t_4$
$a_5$	$a_2$	$t_5$
$a_6$	$a_4$	$t_6$
$a_7$	$a_4$	$t_7$
$a_8$	$a_3$	$t_8$
$a_9$	$a_5, a_7$	$t_9$

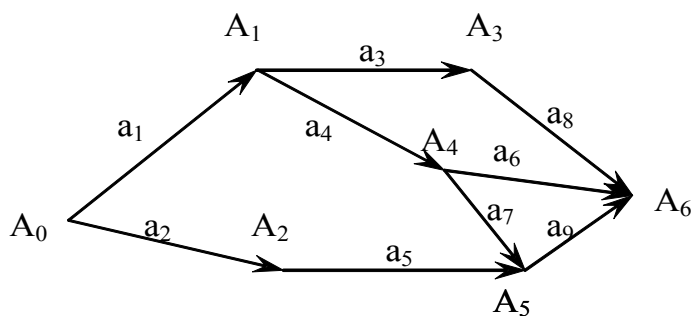


Рис. 37. К построению структурно-временной таблицы

Вершины сети называем *событиями* и обозначаем заглавными буквами с индексом ( $A_1, A_2$  и ак далее до  $A_n$ ). Дуги сети соответствуют некоторым «работам», которые обозначаются строчными буквами ( $a_1, a_2, \dots, a_k$ ). Вес каждой дуги представляет собой «продолжительность» или «величину затрат» на выполнение работы ( $t_1, t_2, \dots, t_k$ ). Будем называть работу  $a_j$  *опор-*

|| ной по отношению к работе  $a_i$ , если она предшествует работе  $a_i$ .

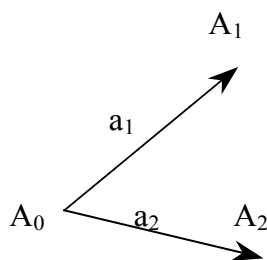


Рис. 38. Исток сети

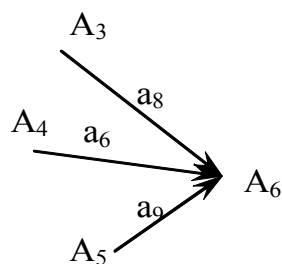


Рис. 39. Сток сети

Структурно-временная таблица представляет собой список работ с указанием опорных работ и затрат на выполнение каждой работы. Используя для описания сети структурно-временную таблицу, не трудно выделить исток сети – вершину, где начинаются работы, для которых не существует опорных (рис. 38); и сток сети (рис. 39) – вершину, в которой заканчиваются работы, не отмеченные в списке опорных.

Графическим аналогом структурно-временной таблицы можно считать циклограммы процессов или диаграммы Ганта.

Для каждой работы, кроме списка опорных и величины затрат можно указать еще некоторое количество дополнительных значений, определяющих свойства работы (свойства и структуру сети, в целом) – в зависимости от сложности прикладной задачи, решаемой с использованием методов дискретной математики.

Следует сказать, что описания некоторых, названных выше, алгебраических структур приведены для лучшего понимания предмета. Так, например, графы с изолированными вершинами достаточно редко используются при описании реальных производственных процессов. Всякие вершины могут представлять собой особые точки (исток, сток) сети. Конфигурация такой сети предполагает выполнение единственно возможной «работы» в начале списка работ и в завершении производственного цикла – следовательно, влияние этих работ на сложность производственного цикла и на совокупную величину затрат, может быть оценено некоторой постоянной величиной, вычисление которой не требует привлечения методов дискретной математики.

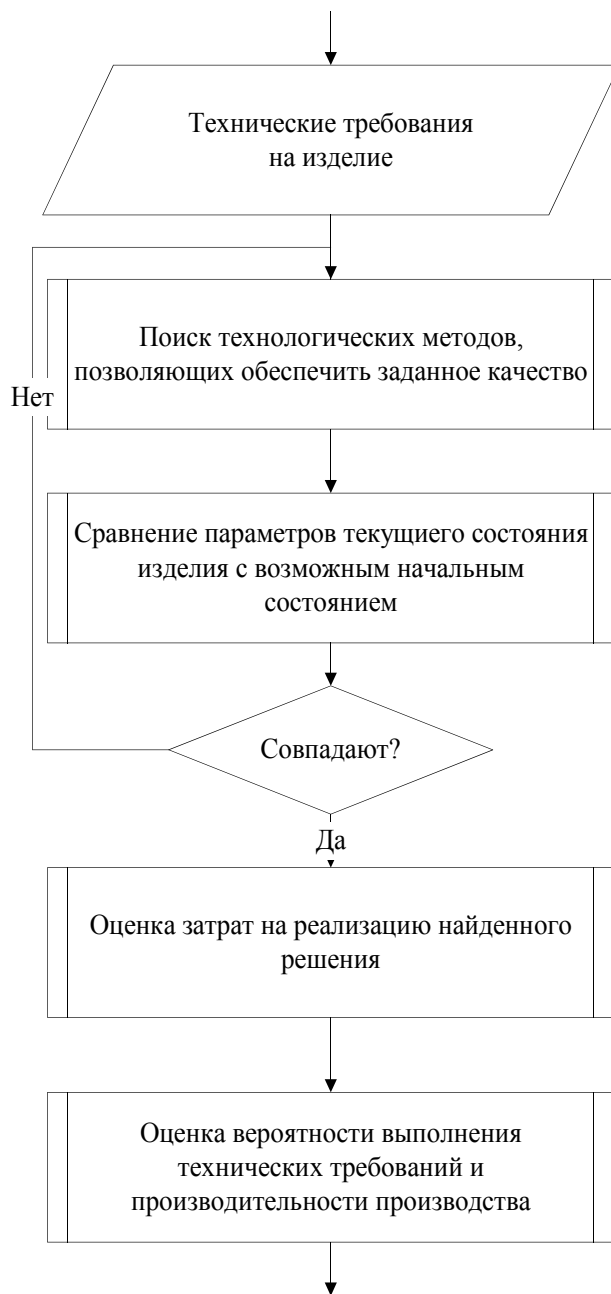
Особый интерес при решении прикладных задач представляют структуры, которые были определены выше понятием «блок», т. е. связные графы, не содержащие мостов и точек сочленения. Если прикладная задача предполагает использование многосвязных структур, то, как правило, такая задача разбивается на отдельные подзадачи. Для того, чтобы выделение подзадач стало возможным, исходная структура разбивается на блоки, каждый из которых содержит только одну компоненту связности.

## Глава 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ПОЗИЦИЙ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Множество частных (рис. 40) инженерных задач, к последовательному решению которых сводится деятельность специалиста, можно разделить на две группы. В отдельную группу выделяют задачи, решение которых сводится к выполнению расчетов по формулам – так называемые, формализованные задачи. Именно для решения формализованных проектных задач были разработаны первые САПР, реализованные на промышленном уровне.

Современные инженерные задачи имеют, как правило, ситуационный характер, так как для современного производства характерны высокие темпы развития, глубокие изменения технической базы под влиянием технического прогресса, мобильность, скоротечность процессов и, как следствие этого, быстрая смена ситуаций и обстоятельств, в которых осуществляется производство.

Большая часть времени отводится на решение задач, которые условно называют неформализованными – задач, для которых не установлены функциональные соотношения или алгоритмы, позволяющие формально, без привлечения интуи-



**Рис. 40. Структура технологического проектирования**



ции и опыта инженера, получать решения, отвечающие техническим требованиям. В самом общем случае, проектная деятельность инженера начинается с концептуального выбора технического решения – и эта задача оказывается наиболее трудной в плане формализации.

До последнего времени автоматизация труда инженера базировалась на принципах моделирования и компьютерной графики. При этом системы компьютеризации труда конструкторов, технологов, технологов-программистов, инженеров-менеджеров и производственных мастеров развивались автономно и инженерные знания – основа проектирования – оставались вне компьютера. Сейчас необходима комплексная компьютеризация инженерной деятельности на всех этапах жизненного цикла изделий, которая получила название CALS (Computer Aided Lifecycle System) технологии. Традиционные САПР с их геометрическим, а не информационным ядром, не могут служить основой для таких систем. Сегодня каждое изделие в процессе своего жизненного цикла должно представляться в компьютерной среде в виде иерархии информационных моделей, составляющих единое целое и имеющих соподчиненность.

Возникновение ошибок, особенно на первом этапе – концептуального решения – приводит к запоздалому запуску изделия в производство. Затраты, возникающие в связи с исправлением ошибок, повторными циклами изготовления, испытания и корректировки опытных образцов ведут к серьезным экономическим потерям. В худшем случае, после всего комплекса конструкторско-технологической проработки, может выясниться, что производство изделия нецелесообразно.

Основным преимуществом применения математических методов и информационных технологий на этапе концептуального проектирования является возможность проведения всестороннего экономического и технического анализа альтернативных решений до окончательного утверждения концептуального проекта.

Операции процесса проектирования можно разбить на два класса: рутинные (нетворческие) и творческие. К числу рутинных относятся расчеты по известным методикам, оформление технической документации, а также поиск информации,

необходимой для выполнения процесса проектирования. Рутинные операции занимают не менее 70 % от общей трудоемкости проектирования.

Развитие современного автоматизированного и механизированного производства основывается на целевом применении к решению производственных задач достижений фундаментальных наук. Построение информационных моделей в современных и перспективных системах автоматизации инженерного проектирования базируется на методах дискретной математики и алгебры множеств. Рассмотрим подробнее возможности формализации задач инженерного, в частности, технологического, проектирования на примере машиностроительных производств.

В общем случае, задачи технологической службы предприятия заключаются в проектировании производства для выпуска заданного количества комплектов определенного изделия (или группы изделий). Исходные данные для технологического проектирования представляются в виде технической (конструкторской и эксплуатационной) документации на изделие, подлежащее производству. Результаты работы технологической службы включают в себя технологическую документацию, конструкторскую документацию по нестандартному оборудованию, планировки производственных помещений и экономическое обоснование проекта производства. В процессе предпроизводственной подготовки решаются задачи технического плана, такие как проектирование технологии для основного и заготовительного производств, нормирование, оснащение основным и вспомогательным оборудованием, инструментальное обеспечение производства.

В основе проектирования технологии механической обработки лежат проблемы формирования заданного качества деталей. Качество большинства изделий машиностроения, в целом, определяется не столько геометрической точностью отдельных поверхностей, сколько точностью взаимного расположения поверхностей, микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками обработанных поверхностей. Соответственно, такие показатели качества обеспечиваются в основном выбором базовых поверхностей на каждом этапе обработки.

## **2.1. Оптимизационные задачи в технологическом проектировании**

Процесс оптимизации параметров механической обработки предусматривает использование двух методов – эвристического и количественного. В эвристическом методе окончательные решения, выработанные путем приемов поиска решения задач и вывода доказательств, основаны на учете опыта решения сходных оптимизационных задач в прошлом, их накопления, учете ошибок, а также интуиции. Исходной информацией при этом служит опыт передовых предприятий, результаты научно-исследовательских работ, опыт производства, результаты отдельных расчетов и другие материалы.

Количественный метод оптимизации – более объективный и получает все большее распространение. В нем оптимальными называют такие значения технологических параметров, при которых достигается наилучшее качество обработки и экономичность. Определение оптимальных параметров имеет смысл в случае, когда установлен критерий оптимальности и указаны ограничения. Метод объясняется оптимизацией технологических параметров механической обработки резанием на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

К технологическим параметрам механической обработки резанием относят скорость, подачу и глубину резания. Глубина резания обычно предопределяется геометрией заготовки и технологическим маршрутом, поэтому проблема заключается в совместной оптимизации скорости и подачи с обратной связью по скорости с учетом технологического процесса, металлорежущих станков, режущего инструмента, заготовки, других, неупомянутых технологических факторов. Возникающая задача оптимизации – многопараметрическая, со множеством переменных параметров, решается на базе математического моделирования постановкой вычислительного и натурного экспериментов на ЭВМ.

**Таблица 5**  
**Методы оптимизации**

Методы оптимизации	Решаемые задачи
Аналитические методы	
Аналитический поиск экстремума	Детерминированные задачи, описываемые дифференцируемыми функциями
Методы множителей Лагранжа	Детерминированные задачи, описываемые дифференцируемыми функциями с ограничениями в виде равенств
Вариационные методы	Критерии оптимальности в виде функционалов
Принцип максимума Понтрягина	Задачи широкого класса; особенно для задач одновременной и совместной оптимизации параметров и допусков
Математическое программирование	
Геометрическое программирование	Оптимизация алгебраических функций
Линейное программирование	Характерные задачи: оптимизация параметров изделий и допусков геометрических параметров
Статистические методы	
Регрессионный анализ, корреляционный анализ	Объекты без детерминированного описания. Оптимизация и планирование эксперимента

Отдельно следует выделить работы организационного плана, выполняемые, как правило, главным технологом: планирование работы подразделений и контроль за выполнением плановых мероприятий. Использование сетевых математических моделей, описывающих организационную структуру технологической службы и соответствующего программного обеспечения, позволяет оптимизировать процесс технологического проектирования и, в конечном итоге, повысить эффективность и оперативность технологической службы предприятия.

## **2.2. Содержательные постановки «сетевых» задач**

Определим термином «сетевая» задача любую инженерную задачу, расчетная схема которой может быть представлена в виде графа или сети. Предположим, что некоторая проблема сводится к перемещению чего-либо (транспорт, заготовки и готовые детали в цехе, пакеты информации в процессе проектирования) в пределах сети (рис. 41) от истока к стоку. Узлы сети (вершины графа) будем рассматривать, как разветвления транспортных путей, в которых могут происходить задержки или трансформация передаваемого потока, связанные, например, с обработкой.

Договоримся обозначать исток сети цифрой 0, сток – буквой  $n$ , а промежуточные узловые пункты – их порядковыми номерами, тогда общее количество узлов

будет равно  $n + 1$ . Условимся обозначать путь, связывающий узлы с определенными (например, 2 и 3) номерами, записью вида (2, 3) или, в общем случае,  $(i, j)$ . Заметим, что связи, изображенные на такой сети, являются направленными, т. е. поток вдоль каждого из этих путей происходит в направлении, указанном стрелкой. Причем их пропускная способность ограничена (трубопровод может пропускать только определенное количество нефти в час, линия связи обслуживает определенное число вызовов в день и т. д.). Обозначим максимальную пропускную способность каждого из путей как  $f_{ij}$ , например на рис. 41 максимальный поток  $f_{23}$ , пропускаемый путем (2, 3), равен 1.

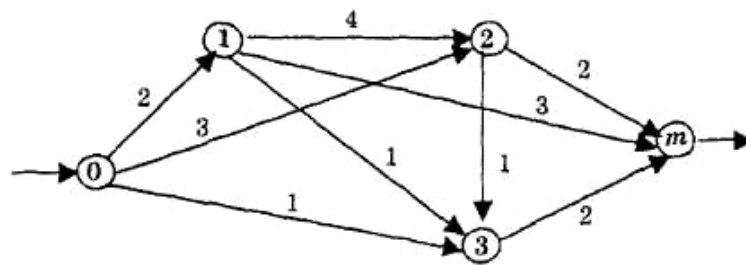


Рис. 41. Диаграмма транспортной сети

При транспортировке поток следует из истока (точка 0) по различным путям через промежуточные узлы в сток (точка  $n$ ), причем количественная характеристика потока не изменяется. Это означает, что мы накладываем на сеть условие сохранения потока в промежуточных узлах: все, что попадает в такой узел, должно полностью покинуть его.

В зависимости от поставленных условий оптимизации выделяются несколько классов сетевых задач:

- задача о потоке минимальной стоимости;
- задача о кратчайшем пути;
- задача о максимальном потоке.

#### 2.2.1. Задача о потоке минимальной стоимости

Пусть дана некоторая сеть, отражающая процесс доставки единицы однородного потока из пункта отправления 0 в пункт назначения  $n$ . С каждой дугой  $(i, j)$  связана стоимость  $C_{ij}$  транспортировки единицы потока из пункта  $i$  в пункт  $j$ .

Всего же из пункта отправления 0 в пункт назначения  $n$  должно быть доставлено определенное количество ( $F$ ) единиц потока таким образом, чтобы общая стоимость перемещения была минимальной. Предположим, что в узлах выполняется условие сохранения потока и что поток  $X_{ij}$  вдоль пути  $(i, j)$  – количество грузов, доставляемых из узлового пункта  $i$  в пункт  $j$ , неотрицателен и ограничен, т. е.  $0 < X_{ij} < F_{ij}$ .

Пусть общий поток  $F = 5$  при  $n = 4$ . Затраты на транспортировку и максимальный поток на каждой дуге сети запишем (табл. 6) в виде пары чисел  $[f_{ij}, C_{ij}]$ , например, на рис. 42 для пути  $(2, 3)$  обозначение  $[1, 2]$  соответствует  $f_{23} = 1$  и  $C_{23} = 2$ .

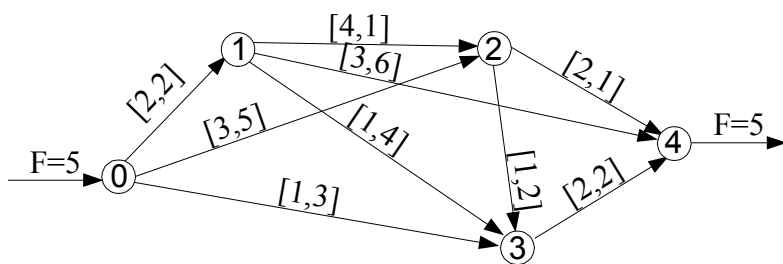


Рис. 42. Задача о потоке минимальной стоимости

Таблица 6  
Описание транспортной сети

Макс. поток		Затраты		Факт. поток
$f_{01}$	2	$C_{01}$	2	$X_{01}$
$f_{02}$	3	$C_{02}$	5	$X_{02}$
$f_{03}$	1	$C_{03}$	3	$X_{03}$
$f_{12}$	4	$C_{12}$	1	$X_{12}$
$f_{13}$	1	$C_{13}$	4	$X_{13}$
$f_{14}$	3	$C_{14}$	6	$X_{14}$
$f_{23}$	1	$C_{23}$	2	$X_{23}$
$f_{24}$	2	$C_{24}$	1	$X_{24}$
$f_{34}$	2	$C_{34}$	2	$X_{34}$

Математическая модель для сети (рис. 42) описывается целевой функцией

$$C = 2 \cdot X_{01} + 5 \cdot X_{02} + 3 \cdot X_{03} + X_{12} + 4 \cdot X_{13} + 6 \cdot X_{14} + 2 \cdot X_{23} + X_{24} + 2 \cdot X_{34}, \quad C \rightarrow \min \quad (3)$$

которая должна достичь минимума при выполнении ограничений, записанных следующими условиями:

– условие сохранения потока:

$$\text{в истоке} \quad X_{01} + X_{02} + X_{03} = 5 ; \quad (4)$$

$$\text{в стоке} \quad -X_{14} - X_{24} - X_{34} = -5 \quad \text{или} \quad X_{14} + X_{24} + X_{34} = 5 ; \quad (5)$$

– условия постоянства потока в узлах сети:

$$-X_{01} + X_{12} + X_{13} + X_{14} = 0 ; \quad (6)$$

$$-X_{02} - X_{12} + X_{23} + X_{24} = 0 ; \quad (7)$$

$$-X_{03} + X_{13} - X_{23} + X_{34} = 0 ; \quad (8)$$

– условия максимального потока по дугам сети:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq X_{01} \leq 2 \\ 0 \leq X_{02} \leq 3 \\ 0 \leq X_{03} \leq 1 \\ 0 \leq X_{12} \leq 4 \\ 0 \leq X_{13} \leq 1 \\ 0 \leq X_{14} \leq 3 \\ 0 \leq X_{23} \leq 1 \\ 0 \leq X_{24} \leq 2 \\ 0 \leq X_{34} \leq 2 \end{array} \right. . \quad (9)$$

В условиях (2 ... 7) слагаемые со знаком «−» учитываются для дуг, входящих в узел сети, со знаком «+» – для исходящих. Соответственно, количество положительных слагаемых равно степени входа вершины сети, а количество отрицательных – степени выхода. Задача, представленная математической моделью (3...9), относится к классу оптимизационных задач и может быть решена методами линейного программирования [1, 69] или с использованием, так называемых, сетевых [3, 52, 76] алгоритмов.

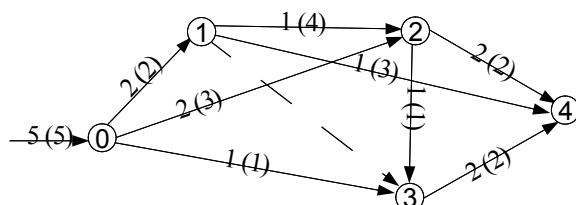


Рис. 43. Фактический поток по дугам сети

Таблица 7  
Фактический поток

$X_{01}$	2	$X_{12}$	1	$X_{23}$	1
$X_{02}$	2	$X_{13}$	0	$X_{24}$	2
$X_{03}$	1	$X_{14}$	1	$X_{34}$	2

Решив (прил. 3) задачу, описанную соотношениями (3 ... 9), получим набор значений (табл. 7) потока  $X_{ij}$ , гарантирующих, что суммарные затраты [формула (3)] на эксплуатацию сети (рис. 42, 43) будут минимальны и сможем определить эту величину. Например, равенство  $X_{01} = 2$  указывает, что из узла 0 в узел 1 предлагается перемещать 2 единицы потока. Соответственно, по пути (1, 2) надо перемещать одну единицу потока ( $X_{12} = 1$ ) и еще одну – из узла 1 в узел 4 ( $X_{14} = 1$ ). Аналитические и графоаналитические методы решения задач линейного программирования достаточно подробно описаны в математической литературе, например

в работах [1, 17, 69] и многих других. Менее известны алгоритмические [14, 52, 76] методы, использующие алгебраические структуры [3, 16, 42, 60, 112] дискретной математики, и позволяющие резко сократить количество вычислений и повысить эффективность моделирования. Определенную сложность представляет лишь выбор постановки, наиболее рационально описывающий решаемую инженерную проблему.

В следующей главе мы покажем, каким образом «задача о потоке минимальной стоимости» может быть применена для формализации технологического проектирования.

### 2.2.2. Задача о кратчайшем пути

Типичным примером является известная [69] «задача коммивояжера»: «Коммивояжер («бродячий торговец») должен посетить каждый город на своей территории. Он выезжает из города, в котором проживает, посещает каждый город ровно один раз и возвращается домой. Требуется найти маршрут, при котором общая протяженность пути коммивояжера будет минимальной».

Пусть коммивояжер должен посетить пять городов: 1, 2, 3, 4 и 5, расстояния между которыми указаны в табл. 8.

**Таблица 8**  
**Длины дуг ориентированного графа**

	1	2	3	4	5
1	0	17	10	15	17
2	18	0	6	12	20
3	12	5	0	14	19
4	12	11	15	0	7
5	16	21	18	6	0

Данные, приведенные в табл. 8, показывают, что «карта» представляет собой полный ориентированный граф, причем длины разнонаправленных дуг, соединяющих одинаковые узлы, различны – например, дуга, соединяющая узел 1 с узлом 3, имеет протяженность 10 единиц, а противоположно направленная дуга, проведенная из узла 3 в узел 1, – 12 единиц. Таким образом, длина маршрута зависит от



направления движения. В качестве начальной и конечной точки любого маршрута примем узел 1.

Рассмотрим один из вариантов. Первый отрезок маршрута заканчивается в точке 3. Оттуда можно переместиться в любой из трех оставшихся узлов – 2, 4 или 5. Допустим, маршрут пролегает через узлы 2, далее 5, затем 4 и потом возврат в точку 1. Последовательность такого перемещения можно представить в виде простого цикла в ориентированном графе (рис. 44), а длина маршрута будет равна сумме длин дуг цикла:  $10 + 5 + 20 + 6 + 12 = 53$ .

Пусть  $X_{ij}$  – дуга из  $i$ -й вершины в  $j$ -ю, причем если по дуге выполняется «переход», то значение  $X_{ij} = 1$ , иначе  $X_{ij} = 0$ . Представим вариант обхода, показанный на рис. 44, в виде табл. 9.

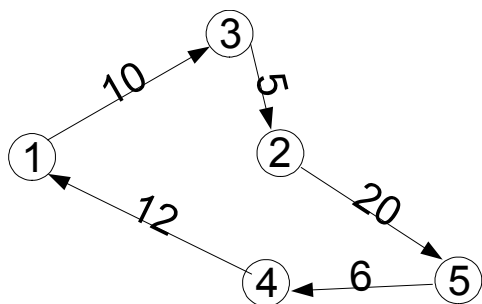


Рис. 44. Возможный маршрут (вариант)

Таблица 9  
Матрица смежности к рис. 44

	1	2	3	4	5
1	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	1
3	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0

Если рассмотреть перемещение через те же узлы, но, в противоположном направлении, то маршрут (рис. 45, табл. 10) будет иметь вид:  $1 - 4 - 5 - 2 - 3 - 1$ . Длина маршрута составит:  $15 + 7 + 21 + 6 + 12 = 61$ .

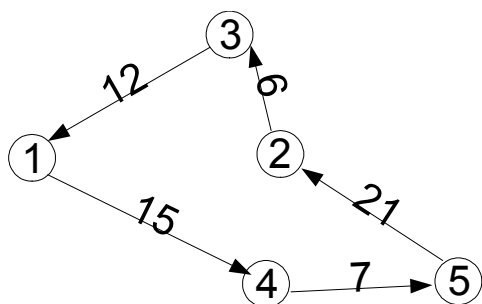


Рис. 45. Обратный маршрут (вариант)

Таблица 10  
Матрица смежности к рис. 45

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	1	0
2	0	0	1	0	0
3	1	0	0	0	0
4		0	0	0	1
5	0	1	0	0	0

Однако кроме этих вариантов есть множество других. Для нашего случая (для пяти вершин) количество [76, 112] таких вариантов составит  $(5-1)! = 24$ .

Поэтому решить задачу простым перебором вариантов даже при незначительном увеличении числа городов становится затруднительно. Для отображения всех возможных маршрутов и их протяженностей, добавим в табл. 8 условные обозначения дуг транспортной сети. Учтем, что расстояние от любого узла сети до него самого равно нулю – сеть без петель – условием

$$\text{для каждого } i \in [1, m], x_{ii} = 0 \quad (10)$$

**Таблица 11**  
**Расширенная матрица смежности**

		Номер столбца $j \in [1, m], m = 5$					
		1	2	3	4	5	
Номер строки $i \in [1, m], m = 5$	1	0 $x_{11}$	17 $x_{12}$	10 $x_{13}$	15 $x_{14}$	17 $x_{15}$	1
	2	18 $x_{21}$	0 $x_{22}$	6 $x_{23}$	12 $x_{24}$	20 $x_{25}$	1
	3	12 $x_{31}$	5 $x_{32}$	0 $x_{33}$	14 $x_{34}$	19 $x_{35}$	1
	4	12 $x_{41}$	11 $x_{42}$	15 $x_{43}$	0 $x_{44}$	7 $x_{45}$	1
	5	16 $x_{51}$	21 $x_{52}$	18 $x_{53}$	6 $x_{54}$	0 $x_{55}$	1
		1	1	1	1	1	

Поскольку в соответствии с условием задачи в каждом узле, кроме начального, можно «побывать» только один раз, то сумма всех вариантов сочетаний перемещений должна быть равна единице. Тогда, общая форма записи этого условия может выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} &\text{для каждого } i \in [1, m], \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \\ &\text{для каждого } j \in [1, m], \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

Условие, в соответствии с которым нельзя дважды проходить по одной и той же дуге, может быть записано в следующем виде:

$$\text{для каждого } i, j \in [1, m], x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad (12)$$

Кратчайший маршрут (для исходных данных из табл. 8) и его матрица смежности приведены на рис. 46 и в табл. 12.

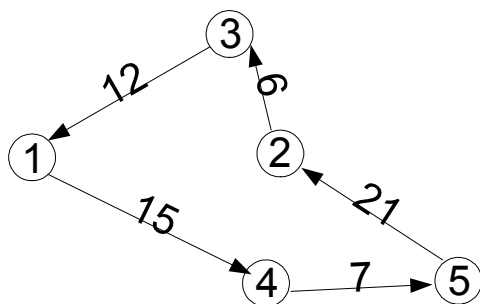


Рис. 46. Кратчайший маршрут

Таблица 12  
Матрица смежности к рис. 46

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	1	0
2	0	0	1	0	0
3	1	0	0	0	0
4		0	0	0	1
5	0	1	0	0	0

Подробное решение задачи рассмотрено в прил. 4.

### 2.2.3. Задача о максимальном потоке

Данная задача представляет собой вариант рассмотренной ранее задачи о потоке минимальной стоимости. Требуется найти максимальную пропускную способность транспортной сети, если известна пропускная способность (рис. 47, табл. 13) каждой дуги.

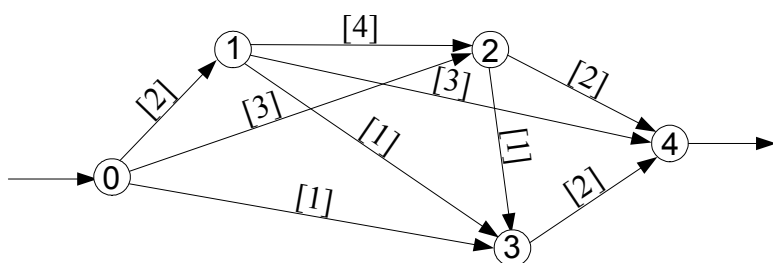


Рис. 47. Задача о максимальном потоке (исходная)

Таблица 13  
К задаче о максимальном потоке

Максимальный поток		Фактический поток
$f_{01}$	2	$X_{01}$
$f_{02}$	3	$X_{02}$
$f_{03}$	1	$X_{03}$
$f_{12}$	4	$X_{12}$
$f_{13}$	1	$X_{13}$
$f_{14}$	3	$X_{14}$
$f_{23}$	1	$X_{23}$
$f_{24}$	2	$X_{24}$
$f_{34}$	2	$X_{34}$

Целевая функция, для которой должен быть найден максимум, может быть записана из предположения, что поток на входе (узел 0, рис. 47) в сеть должен быть равен потоку на выходе (узел 4, рис. 47) из сети. Пропускная способность сети, в целом, определяется как минимальное из все найденных максимальных значений.

$$F = \min \left\{ \begin{array}{l} \max (X_{01} + X_{02} + X_{03}) \\ \max (X_{14} + X_{24} + X_{34}) \end{array} \right. . \quad (13)$$

Подобные рассуждения могут быть применены к каждому узлу сети. Система ограничений для оптимизационной задачи будет записана следующим образом:

– постоянство потока в узле – входящий в узел поток должен быть равен выходящему

$$\begin{cases} X_{01} = X_{12} + X_{13} + X_{14} \\ X_{02} + X_{12} = X_{23} + X_{24} \\ X_{03} + X_{13} + X_{23} = X_{34} \end{cases} ; \quad (14)$$

– фактический поток по дуге сети должен быть неотрицательным и не может превышать пропускной способности дуги

$$\begin{cases} 0 \leq X_{01} \leq f_{01} \\ 0 \leq X_{02} \leq f_{02} \\ 0 \leq X_{03} \leq f_{03} \\ 0 \leq X_{12} \leq f_{12} \\ 0 \leq X_{13} \leq f_{13} \\ 0 \leq X_{14} \leq f_{14} \\ 0 \leq X_{23} \leq f_{23} \\ 0 \leq X_{24} \leq f_{24} \\ 0 \leq X_{34} \leq f_{34} \end{cases} . \quad (15)$$

В результате решения (прил. 5) задачи установлено (рис. 48, табл. 14), что из транспортной сети можно исключить дуги [1, 2] и [1, 3] и уменьшить поток по дуге [1, 4], по сравнению с максимальным, без потери пропускной способности сети в целом.

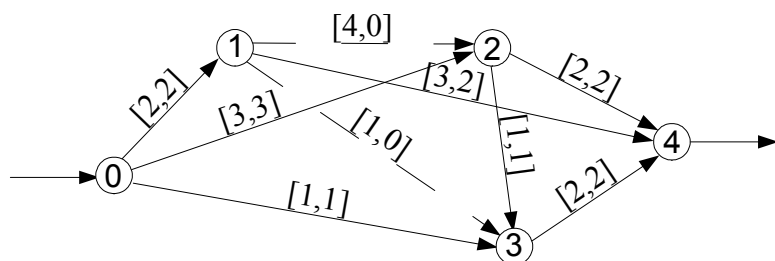


Рис. 48. Задача о максимальном потоке (результат)

Таблица 14  
Фактические потоки

Максимальный поток		Фактический поток	
$f_{01}$	2	$X_{01}$	2
$f_{02}$	3	$X_{02}$	3
$f_{03}$	1	$X_{03}$	1
$f_{12}$	4	$X_{12}$	0
$f_{13}$	1	$X_{13}$	0
$f_{14}$	3	$X_{14}$	2
$f_{23}$	1	$X_{23}$	1
$f_{24}$	2	$X_{24}$	2
$f_{34}$	2	$X_{34}$	2

В рассмотренном примере задача была решена как оптимизационная задача линейного программирования. Такой подход достаточно надежно работает при небольшом количестве узлов транспортной сети. При увеличении сложности транспортной сети существенно увеличивается количество дуг сети и, следовательно, количество уравнений и неравенств в системе ограничений оптимизационной задачи. Соответственно возрастает сложность и трудоемкость решения задачи. Использование методов дискретной математики [62, 63, 112] позволяет снизить вычислительную сложность задачи.

#### 2.2.4. Задача перераспределения ресурсов

Для каждой работы можно определить некоторый коэффициент ( $c_1, c_2, \dots, c_k$ ). Физически этот коэффициент представляет собой плотность потока по дуге сети в единицу времени. Тогда произведение  $t_j \cdot c_j$  есть собственно величина потока. В конкретных проектах в качестве  $c_j$  можно принимать показатель значимости работы  $a_j$  в конечном результате процесса, или вероятность выполнения работы в срок, или отношение потраченного на выполнение работы времени к нормативу времени (коэффициент загрузки). Для равнозначных работ можно принять коэффициенты  $c_j=1$ .

Представить производственный (или иной) процесс можно в виде ориентированного взвешенного графа (рис. 53) со следующими свойствами:

- существует единственная вершина графа ( $A_0$  на рис. 53), из которой дуги выходят – «исток»;
- существует единственная вершина графа ( $A_9$  на рис. 53), в которую дуги входят – «сток»;
- в графе отсутствуют замкнутые пути;
- для любой вершины графа существует хотя бы один путь из «истока» в «сток», проходящий через эту вершину.

Задача сетевого планирования может преследовать две цели.

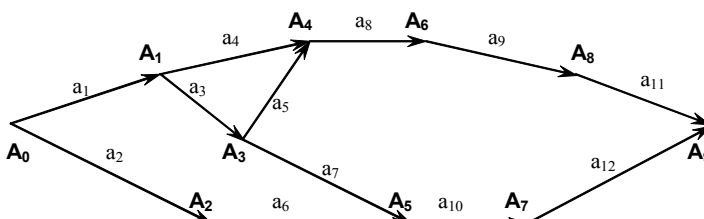
- Найти кратчайший маршрут от «истока» до «стока» и его протяженность.
- Оптимизировать план, то есть перераспределить веса ребер графа таким об-

разом, чтобы все возможные пути из «источка» в «сток» имели одинаковую протяженность, не большую первоначальной максимальной протяженности.

Формирование графического представления схемы процесса удобнее вести в направлении «к началу» – от «стока» к «истoku». Диаграмма (рис. 49) и структурно-временная таблица (табл. 15), иллюстрирующие последовательность выполнения работ, показаны ниже

**Таблица 15.**  
**Список работ**

Работа	Опорная работа	Затраты (время)	C
$a_1$	—	5	0,1
$a_2$	—	8	0,2
$a_3$	$a_1$	3	0,3
$a_4$	$a_1$	8	0,4
$a_5$	$a_3$	2	0,5
$a_6$	$a_2$	4	0,6
$a_7$	$a_3$	7	0,7
$a_8$	$a_4, a_5$	5	0,8
$a_9$	$a_8$	3	0,9
$a_{10}$	$a_6, a_7$	5	1,0
$a_{11}$	$a_9$	4	1,1
$a_{12}$	$a_{10}$	3	1,2



**Рис. 49.** Диаграмма выполнения работ для табл. 15

Рассчитаем длительности возможных путей из вершины  $A_0$  в вершину  $A_9$  (рис. 49, табл. 15):

$$T_1 = t_1 + t_4 + t_8 + t_9 + t_{11} = 5 + 8 + 5 + 3 + 4 = 25,$$

$$T_2 = t_1 + t_3 + t_5 + t_8 + t_9 + t_{11} = 5 + 3 + 2 + 5 + 3 + 4 = 22,$$

$$T_3 = t_1 + t_3 + t_7 + t_{10} + t_{12} = 5 + 3 + 7 + 5 + 3 = 23,$$

$$T_4 = t_2 + t_6 + t_{10} + t_{12} = 8 + 4 + 5 + 3 = 20.$$

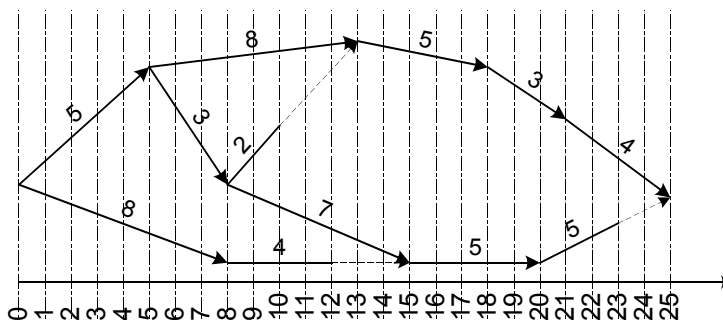
Путь  $T_1$ , продолжительность которого максимальна, назовем критическим.

Для удобства анализа, отложим на временной шкале метки времени в соответствии с табл. 15 и выполним построения

в масштабе. Построение масштабной схемы начинаем от критического пути.

На масштабном чертеже (рис. 50):

- вертикальные штрих-пунктирные линии показывают отсчеты времени;
- сплошные стрелки соответствуют работам (табл. 15);
- числа над стрелками показывают продолжительности работ.



**Рис. 50.** Масштабный чертеж графа на временной шкале

Выделим каждый из путей.

Масштабная диаграмма (рис. 51) показывает, что за промежуток времени от 5 до 13 (продолжительность 8) могут быть выполнены или работы  $a_3$  и  $a_5$  суммарной продолжительностью 5, или работа  $a_4$  продолжительностью 8. Следовательно,

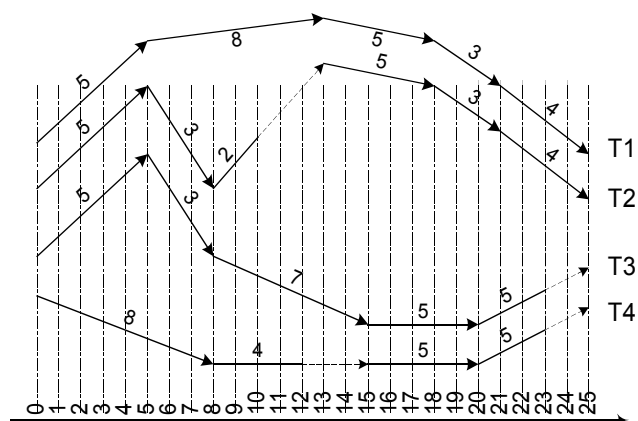


Рис. 51. Выделенные пути

процесс, выполняемый по пути  $T_2$

может быть осуществлен на  $T_1 - T_2 = 25 - 22 = 3$  часа быстрее, чем по критическому пути  $T_1$ . В подобных случаях говорят о резерве времени (или иных ресурсов). Аналогичные рассуждения можно провести и для сочетаний путей  $T_1 - T_3$  (резерв составляет 2) и  $T_1 - T_4$  (резерв составляет 5). Штриховые стрелки на масштабной диаграмме (рис. 51) показывают резервы на путях:

$T_2$  – при выполнении работы  $a_5$  резерв времени составит  $t_{5св} = 3$ ;

$T_3$  – при выполнении работы  $a_{12}$  резерв времени составит  $t_{12св} = 2$ ;

$T_4$  – при выполнении работ  $a_6$  и  $a_{12}$  резерв времени составит  $t_{6св} = 3$  и  $t_{6св} = 2$ .

Очевидно, что кратчайшим является путь  $T_4$ , то есть для максимального ускорения, результат необходимо получать, выполняя последовательно работы  $a_2$ ,  $a_6$ ,  $a_{10}$ ,  $a_{12}$ . Протяженность указанного пути равна 20.

Оптимизация графа состоит в ликвидации резервов времени (ресурсов), так, чтобы:

- изменился критический путь или изменилась (уменьшилась) его продолжительность;
- все пути на графе имели одинаковую протяженность, не превосходящую протяженности первоначального критического пути.

Оптимизация производится переносом средств (ресурсов) с работ, имеющих резерв времени, на работы критического пути. При этом нельзя переносить средства на работы, принадлежащие одному и тому же пути. Так, например,

перенос ресурсов с работы  $a_5$  (путь  $T_2$ ) возможен только на работу  $a_4$  (путь  $T_1$ ), так как работы  $a_1, a_8, a_9, a_{11}$  принадлежат пути  $T_1$  и пути  $T_2$  одновременно.

Выполнение оптимизации проводится в несколько этапов (циклически). После каждого этапа проверяется длительность критического пути и наличие резервов. Если достигается равенство продолжительности всех возможных путей (отсутствие резервов), оптимизация завершается.

Рассчитаем перенос средств с пути  $T_2$  на путь  $T_1$ .

Переносим средства с работы  $a_5$  (величина  $\bar{x}_5$ ) на работу  $a_4$  (величина  $\bar{x}_4$ ). Очевидно, что количество заимствованных ресурсов должно быть равно количеству добавленных:  $\bar{x}_5 = \bar{x}_4$ .

Кроме того, продолжительности путей  $T_2'$  (после увеличения  $t_5$ ) и  $T_1'$  (после уменьшения  $t_4$ ) должны быть также равны:  $T_2' = T_1'$ .

Запишем и решим систему уравнений:

$$\begin{cases} \tilde{x}_5 = \tilde{x}_4 \\ T_1 - t_4 c_4 \tilde{x}_4 = T_2 + t_5 c_5 \tilde{x}_5 \end{cases} \Leftrightarrow \tilde{x}_4 = \tilde{x}_5 = \frac{T_1 - T_2}{t_4 c_4 + t_5 c_5} = \frac{3}{8 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,5} = 0,714.$$

Доля заимствованных средств, не должна превышать доли резерва времени в продолжительности соответствующего этапа работ:

$\tilde{x}_5 \leq \frac{t_{5_{\text{св}}}}{t_5 c_5}$ . В нашем случае

$0,714 \leq \frac{3}{2 \cdot 0,5} = 3$ , то есть условие допустимости решения выполнено.

Измененные длительности работ:

$$\begin{cases} t_4' = t_4 - t_4 c_4 \tilde{x}_4 = 8 - 8 \cdot 0,4 \cdot 0,714 = 5,7 \approx 6 \\ t_5' = t_5 + t_5 c_5 \tilde{x}_5 = 2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,714 = 2,7 \approx 3 \end{cases}$$

Таблица 16

После первого этапа

Работа	Опорная работа	Затраты (время)		C
		до начала	шаг 1	
$a_1$	—	5	5	0,1
$a_2$	—	8	8	0,2
$a_3$	$a_1$	3	3	0,3
$a_4$	$a_1$	8	<b>6</b>	0,4
$a_5$	$a_3$	2	<b>3</b>	0,5
$a_6$	$a_2$	4	4	0,6
$a_7$	$a_3$	7	7	0,7
$a_8$	$a_4, a_5$	5	5	0,8
$a_9$	$a_8$	3	3	0,9
$a_{10}$	$a_6, a_7$	5	5	1,0
$a_{11}$	$a_9$	4	4	1,1
$a_{12}$	$a_{10}$	3	3	1,2

Примечание. Выделены изменившиеся в результате расчета значения



В табл. 16 приведены продолжительности отдельных работ после выполнения первого этапа оптимизации. Конфигурация (рис. 49) графа в целом и отдельных путей не изменилась. Новые протяженности путей составляют:

$$\begin{aligned} T_1 &= t_1 + t_4 + t_8 + t_9 + t_{11} = 5 + 6 + 5 + 3 + 4 = 23, \\ T_2 &= t_1 + t_3 + t_5 + t_8 + t_9 + t_{11} = 5 + 3 + 2 + 5 + 3 + 4 = 23, \\ T_3 &= t_1 + t_3 + t_7 + t_{10} + t_{12} = 5 + 3 + 7 + 5 + 3 = 23, \\ T_4 &= t_2 + t_6 + t_{10} + t_{12} = 8 + 4 + 5 + 3 = 20. \end{aligned}$$

Протяженность путей  $T_3$  и  $T_4$  не изменилась. Критические пути ( $T_1, T_2, T_3$ ) имеют одинаковую протяженность  $T_{кр} = 23$ . Резерв времени пути  $T_4$  составляет 3.

Второй этап оптимизации начинаем с определения работы, на которой формируется резерв времени. Для этого строим масштабную схему процесса по вновь полученным (табл. 16, графа «шаг 1») данным.

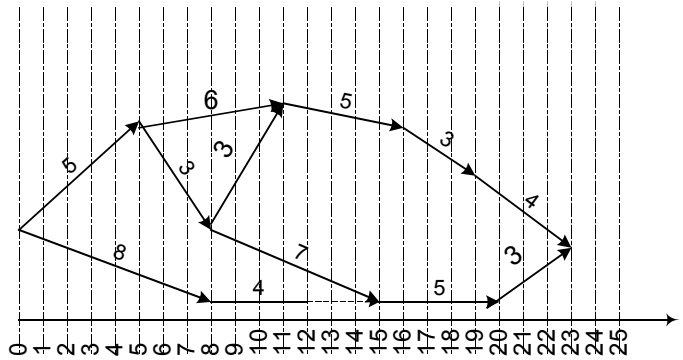


Рис. 52. Граф после первого этапа оптимизации

Сравнивая диаграммы на рис. 52 и рис. 49, определим, что с резервом времени  $t_{6св} = 3$  выполняется работа  $a_6$ . Перенос ресурсов с работы  $a_6$  возможен только на работу  $a_1$ , так как работы  $a_{10}$  и  $a_{12}$  являются общими для критического пути  $T_3$  и некритического пути  $T_4$ . Так как работа  $a_1$  является общей для путей  $T_1, T_2$  и  $T_3$ , коррекция времени  $t_1$  позволит изменить протяженность всех критических путей одинаково, что существенно упрощает расчеты.

Расчет выполняем аналогично первому этапу.

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = \tilde{x}_6 \\ T_1 - t_1 c_1 \tilde{x}_1 = T_4 + t_6 c_6 \tilde{x}_6 \end{cases} \Leftrightarrow \tilde{x}_1 = \tilde{x}_6 = \frac{T_1 - T_4}{t_1 c_1 + t_6 c_6} = \frac{3}{5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,6} = 1,03.$$

Условие допустимости решения  $\tilde{x}_6 = 1,03 \leq \frac{t_{6св}}{t_6 c_6} = \frac{3}{4 \cdot 0,6} = 1,25$  выполнено.

Измененные длительности:

$$\begin{cases} t'_1 = t_1 - t_1 c_1 \tilde{x}_1 = 5 - 5 \cdot 0,1 \cdot 1,03 = 4,48 \approx 4,5 \\ t'_6 = t_6 + t_6 c_6 \tilde{x}_6 = 4 + 4 \cdot 0,6 \cdot 1,03 = 6,47 \approx 6,5 \end{cases}$$

В табл. 17 приведены продолжительности отдельных работ после выполнения второго этапа оптимизации. Конфигурация (рис. 49) графа в целом и отдельных путей не изменилась. Новые протяженности путей равны:

$$\begin{aligned} T_1 &= 4,5 + 6 + 5 + 3 + 4 = 22,5; \\ T_2 &= 4,5 + 3 + 2 + 5 + 3 + 4 = 22,5; \\ T_3 &= 4,5 + 3 + 7 + 5 + 3 = 22,5; \\ T_4 &= 8 + 6,5 + 5 + 3 = 22,5. \end{aligned}$$

Поскольку протяженности всех путей равны, задача решена.

**Таблица 17**  
**После второго этапа**

Работа	Опорная работа	Затраты (время)			C
		до начала	шаг 1	шаг 2	
$a_1$		5	5	<b>4,5</b>	0,1
$a_2$		8	8	8,0	0,2
$a_3$	$a_1$	3	3	3,0	0,3
$a_4$	$a_1$	8	<b>6</b>	<b>6,5</b>	0,4
$a_5$	$a_3$	2	<b>3</b>	3,0	0,5
$a_6$	$a_2$	4	4	4,0	0,6
$a_7$	$a_3$	7	7	7,0	0,7
$a_8$	$a_4, a_5$	5	5	5,0	0,8
$a_9$	$a_8$	3	3	3,0	0,9
$a_{10}$	$a_6, a_7$	5	5	5,0	1,0
$a_{11}$	$a_9$	4	4	4,0	1,1
$a_{12}$	$a_{10}$	3	3	3,0	1,2
Примечание. Выделены изменившиеся в результате расчета значения					

В табл. 17 приведены окончательные результаты расчета времени на каждом этапе процесса.

#### 2.2.5. Задача о назначениях

В общем виде задача о назначениях формулируется [12, 69] следующим образом: «Имеется  $n$  работ и такое же количество кандидатов для их выполнения. Затраты каждого ( $i, i=[1...n]$ ) кандидата на выполнение каждой ( $j, j=[1...n]$ ) работы известны и равны  $c_{ij}$ . Каждый кандидат может быть назначен только на одну работу, и каждая работа может быть выполнена только одним кандидатом. Требуется найти такое назначение кандидатов на работы, при котором суммарные затраты на выполнение работ минимальны».

Запишем данную задачу формализованно. Пусть  $x_{ij}$  – переменная, значение которой равно единице, если  $i$ -й кандидат выполняет  $j$ -ю работу, и 0 – в противном случае. Тогда условие о том, что каждый кандидат выполняет только одну работу, запишется в виде:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \text{ для каждого } j \in [1, n]. \quad (16)$$

Условие о том, что каждая работа может выполняться одним кандидатом:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \text{ для каждого } i \in [1, n]. \quad (17)$$

Суммарные затраты на выполнение всех работ могут быть определены как сумма затрат на выполнение каждой работы каждым кандидатом. Если  $i$ -й кандидат не выполняет  $j$ -ю работу, то произведение  $c_{ij} \cdot x_{ij} = 0$ , если выполняет –  $c_{ij} \cdot x_{ij} = c_{ij}$ .

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}. \quad (18)$$

Запись задачи о назначениях в общей форме выглядит следующим образом:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min; \quad (19)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, & \text{для всех } j \in [1, n]; \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, & \text{для всех } i \in [1, n]; \\ x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{для всех } j \in [1, n]; \\ 1, & i \in [1, n]. \end{cases} \end{cases}$$

Решить задачу о назначениях – значит найти такие значения  $x_{ij}$ , которые удовлетворяют системе ограничений и доставляют минимум целевой функции. Задача (19) представляет собой задачу линейного программирования, так как и целевая функция и ограничения описываются линейными функциями. Также задачу (19) можно рассматривать как «задачу о потоке минимальной стоимости» или «задачу о кратчайшем пути», в которых правые части ограничений равны единице, а переменные могут принимать только два значения.

### 2.3. Размерный анализ

Перед тем как любое изделие будет направлено для изготовления на производство и дальнейшую эксплуатацию, должен быть выполнен большой объем подготовительных работ, связанных, в частности, с технологической подготовкой

производства. От качества проектирования технологических процессов, от их глубины проработки во многом зависит эффективность самого производства, а именно, материалоемкость, энергоемкость производства, и затраты, связанные с перестройками, улучшением производства, технологических процессов, с целью устранения ошибок. Технологическая подготовка производства в качестве своей основы включает размерный анализ. Размерный анализ – это совокупность расчетно-аналитических процедур, осуществляемых при разработке и анализе конструкций и технологических процессов [7, 87, 98].

К размерному анализу относятся, во-первых, вопросы, связанные как с разработкой и анализом конструкций – определением и проверкой необходимых и достаточных требований, точности размеров, формы и взаимного расположения. Во-вторых, вопросы, связанные с разработкой технологических процессов: расчеты номинальных и предельных значений технологических размеров, прогнозирование возможных значений припусков, назначение всех промежуточных размеров на обработку, вычисление оптимальной, с точки зрения механической обработки, простановки размеров и назначение базовых поверхностей [58, 68]. В-третьих, размерный анализ связан с анализом технологических процессов сборки – это проверка собираемости сборочных единиц, комплектов, изделий; выбор вида сборки по уровню взаимозаменяемости, обеспечение заданных значений выходных характеристик изделия.

Цель размерного анализа – это, во-первых, обеспечение качества и технологичности изделий, их элементов, заготовок. Во-вторых, получение размеров и предельных отклонений, необходимых для заполнения технологических карт, эскизов наладок, управляющих программ, расчета режимов резания, норм времени. В конечном счете, – минимизация издержек производства.

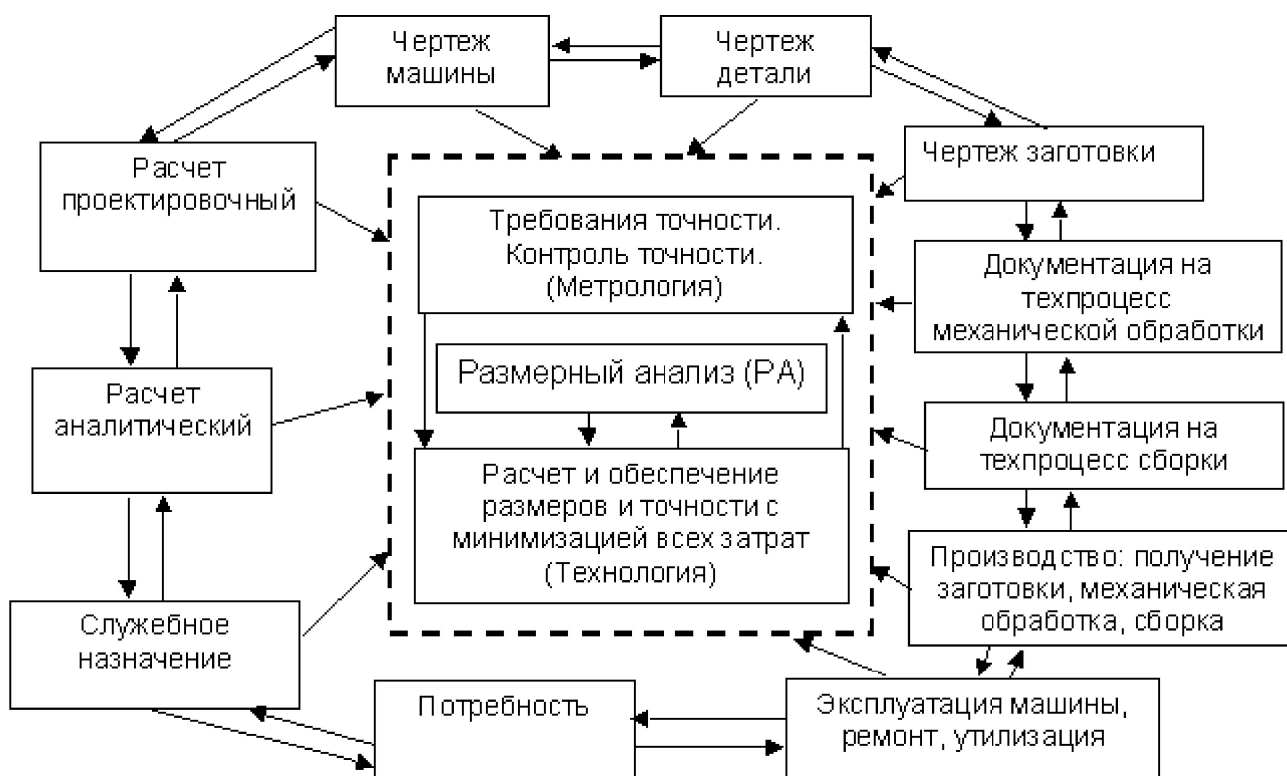
Размерный анализ – это большой комплекс работ, который включает в себя:

- построение специальных размерных схем технологических процессов;
- выявление и фиксацию взаимосвязей всех размерных параметров;
- выявление размерных целей;

- проверка и установление рациональных способов простановки размеров в чертежах;
- назначение достаточного и необходимого числа технических требований;
- назначение обоснованных допусков, минимально необходимых припусков;
- проверочный расчет возможности обеспечения чертежных размеров и технических требований;
- расчет средних и минимальных припусков;
- определение номинальных значений операционных размеров;
- определение толщины покрытий, глубины азотирования и других характеристик.

Проведение комплекса работ размерного анализа является совершенно необходимым, без этого само проектирование технологических процессов невозможно, поскольку сводится к укрупненному проектированию технологии на уровне типовой технологии. Даже при наличии типовой технологии, операционных эскизов – без простановки размеров и допусков – технологических, научно обоснованных, технология не реализуема, точно так, как конструкция без конструкторских размеров и допусков.

Если смотреть с самых общих позиций, размерный анализ – это основа минимизации затрат при обеспечении качества в жизненном цикле изделий машиностроения [13], поскольку [67] размерный анализ связан (рис. 53) с исследованием рабочих процессов, формулированием служебного назначения машины, аналитическими и проектировочными расчетами, получением чертежа машины и чертежа детали, заготовки, всей технологической документации, обеспечением размеров на производстве, анализом машины в процессе эксплуатации. Все эти проблемы опираются на размерный анализ, который в свою очередь, во-первых, связан с требованиями точности, контролем точности, – с метрологией, во-вторых, связан с обеспечением размеров и точности с минимизацией всех затрат – с технологией.



**Рис. 53. Взаимосвязь размерного анализа с жизненным циклом изделия**

Для обеспечения качественного проведения размерного анализа были выполнены многочисленные исследования, связанные с параметрами точности деталей – работы В. С. Корсакова [68], А. П. Соколовского [97], Б. С. Балакшина [5], А. М. Дальского [36], И. М. Колесова [56] и других; связанные с размерными цепями, – размерные цепи являются основой размерного анализа – работы С. И. Брука, Б. И. Лившица [11], В. П. Пузановой [85], П. Ф. Дунаева [39], И. А. Иващенко [46], Б. М. Базрова [4] и других исследователей. Очень важной проблемой в комплексе работ размерного анализа является построение графических схем размерных цепей – этот вид работ по трудоемкости аналогичен разработке сборочного чертежа изделия. Без сборочного чертежа невозможно спроектировать и изготовить изделие, и аналогично без построения размерных схем невозможно провести размерный анализ. Следует отметить в качестве основных, наиболее продвинутых методов построения размерных схем и расчетов, на них основанных, – методы Б. С. Мордвинова [72] и В. В. Матвеева [87]. Необходимо также остановиться на таком важном вопросе, как геометрические параметры и модели точности. В. И. Глуховым [18] предложена методика – рассматривать всю деталь,

как совокупность элементарных поверхностей, связанных между собой всевозможными связями, с особым вниманием к тем степеням свободы, которых лишает данную деталь какая-либо поверхность или комплект поверхностей. Большое значение имеет представление модели детали на основе векторных функций, что было предложено И. Г. Браиловым и М. Н. Одинец [10].

Поскольку размерный анализ является весьма сложным и трудоемким видом работы, были разработаны методы автоматизации размерного анализа. Наиболее развитые методы автоматизированного расчета операционных размеров, отклонений расположения на основе размерных цепей – методы И. А. Иващенко [46], Б. С. Мордвинова [73], В. В. Матвеева [87], Ю. М. Сметанина [95] и других. Основное их достоинство – это уменьшение времени и повышение качества проектирования; основным недостатком является необходимость формирования размерных схем и графов в ручном режиме, что затрудняет внедрение данных методик на производстве. Предложены компьютеризированные, на современной основе, методики: – методика О. Н. Калачева [48] – отличается тем, что размерная схема также строится вручную, но на экране компьютера. Трудоёмкость осталась, единственное отличие в том, что построение схем выполняется не на листе бумаги, а на экране компьютера. Наиболее совершенная методика – это модуль «Расчет размерных технологических цепей» в КОМПАС-АВТОПРОЕКТ [107]. Достоинство методики состоит в том, что не нужно строить размерные схемы, но есть и существенный недостаток – большая трудоемкость анализа, обусловленная необходимостью расчета и упорядочения цифровых и графических данных, которые вручную вводятся с помощью специальных «окон» для того, чтобы можно было выполнить расчет.

Традиционно задача размерного анализа решается в несколько этапов:

1. формирование расчетной схемы технологического процесса;
2. проверка правильности расчетной схемы;
3. поиск замыкающих звеньев;
4. формирование размерных цепей;

5. преобразование списка размерных цепей в систему линейных уравнений, моделирующих процесс формирования точности изделия;
6. решение системы уравнений;
7. анализ полученных результатов – определение по расчетной схеме моментов времени, в которые были допущены ошибки и поиск методов устранения дефектов технологического процесса.

Необходимо учитывать, что процедура размерного анализа является итерационной. После определения методов исправления технологического процесса обязательно следует повторение всей последовательности действий – с п. 1 по п. 7. Цикл завершается, если анализ результатов решения (п. 7) показывает отсутствие несоответствий между параметрами замыкающих размеров и размеров готовой детали. В приведенной последовательности существуют этапы:

- с высоким уровнем формализации – используются математические алгоритмы (пп. 5, 6) или методы обработки символьной, предварительно классифицированной, информации (п. 3);
- со средним уровнем формализации – предполагается частично «ручная» обработка информации или использование неоптимальных алгоритмов полного перебора (пп. 2, 4);
- неформализованные, предполагающие использование опыта и знаний специалиста-технолога (пп. 1, 7).

Процедура формирования расчетной схемы (п. 1) может быть формализована с использованием алгоритмов [10] векторной компьютерной графики, поскольку расчетная схема представляет собой иную форму представления операционных эскизов. Однако на этом этапе остается неформализованной процедура классификации [48, 87] размеров технологического процесса. В настоящее время в различных программных системах автоматизации технологических расчетов для определения классов и, соответственно, параметров размерных связей используются, в основном, числовые [87] системы кодирования.



Анализируя возможности описанных выше структур данных, можно отметить, что процедура построения размерной цепи (п. 4) практически идентична поиску эйлеровых путей в ориентированном графе. Следовательно, для рациональной формализации этого этапа следует использовать соответствующие алгоритмы дискретной математики, что становится возможным при правильно выбранной модели представления технологического процесса. Одновременно появляется возможность выполнить формальную проверку (п. 2) корректности расчетной схемы – очевидно, что в основе любой технологической размерной цепи должен лежать планарный граф, для которого выполняется соотношение Эйлера (23), определяющее взаимосвязь между числом вершин, ребер и компонент смежности.

Таким образом, можно формализовать практически все процедуры размерного анализа, оставив для специалиста только процедуру принятия решения о конкретных методах корректировки технологического процесса.

Необходимо остановиться на вопросах, связанных с недостатками существующих методик, с недоработками в размерном анализе, с созданием улучшенных методик с целью совершенствования размерного анализа. В качестве таких вопросов можно остановиться, во-первых, на проблеме более строгого обоснования используемых геометрических моделей деталей и моделей точности деталей, во-вторых, на проблеме автоматизации построения размерных схем, в-третьих, на более точном отражении в расчетах таких параметров детали, как отклонения расположения – в существующих методиках размерного анализа может быть обеспечен расчет размеров деталей не очень сложной формы. В-четвертых, для деталей более сложной формы, где начинают влиять отклонения расположения, возникает следующая проблема – при построении схемы размерных цепей для проведения размерного анализа технологических процессов мы заранее определяем направления звеньев размерных цепей, хотя в процессе определения величин расстояний, расчета и корректировки размеров направление отдельных звеньев размерных цепей может измениться на противоположное [66]. Все рассмотренные проблемы должны быть учтены при совершенствовании методики размерного анализа.

### Глава 3. СОДЕРЖАТЕЛЬНЫЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Наиболее удачной попыткой формализации связей между последовательностью применения методов обработки отдельных поверхностей и точностными показателями изделия в целом является методика размерного анализа технологических процессов, представляющая технологическую последовательность в виде системы линейных уравнений. Вычислительный математический аппарат для решения системы уравнений не отличается особой сложностью и традиционно изучается в курсе высшей математики технического вуза. Этого нельзя сказать о неформализованной задаче генерации системы уравнений по описанию последовательности обработки. Если рассматривать проектную документацию как структурно-временную таблицу, можно представить последовательность обработки изделия в виде ориентированного графа. Применение методов дискретной математики позволяет свести задачу генерации математической модели обработки к известной «Задаче Эйлера» или «Задаче о кенигсбергских мостах». Используя любой из алгоритмов поиска Эйлеровых путей в графе, можно проверить наличие связей между границами замыкающих звеньев и, таким образом, получить описание графа в виде системы линейных уравнений.

Аналогичные рассуждения можно применить к проблеме нахождения возможных последовательностей методов обработки, обеспечивающих получение поверхностей детали с заданными точностными показателями. В этом случае анализ таблиц точности обработки позволяет построить «граф обработки поверхности», в котором можно искать или Эйлеровы пути – все возможные последовательности, или кратчайший (задав критерий длины каждого ребра графа) маршрут – оптимальную последовательность. Экономический характер подобных задач определяется выбором критерия оптимизации – выше было отмечено, что в качестве критерия правильности чаще всего применяется величина затрат на производство.

Таким же образом к методам линейного программирования можно свести задачи расчета оптимальных режимов обработки, расчета межоперационных заде-

лов, синхронизации по времени отдельных операций при проектировании поточного производства и т. д.

Часть задач по обеспечению работоспособности машиностроительного производства следует отнести к задачам организационного характера, таким как, например, организация плановых ремонтов оборудования, занятого в производстве. При постановке оборудования на плановый, а тем более на внеплановый, ремонт возникает необходимость перераспределения загрузки работающего оборудования. Подобная задача решается и в процессе предпроизводственной подготовки – при оснащении технологического процесса основным оборудованием и при проектировании планировок и компоновок производственных помещений.

### **3.1. Обеспечение требований качества изделия**

Выше мы определили, что технологическое проектирование является процессом, рассмотрение (и прогнозирование) которого возможно с позиций экономико-математического моделирования. В частности, вполне оправданным является рассмотрение задач технологии как оптимизационных. Для большинства задач технологического проектирования можно найти множество «правильных» решений, т. е. решений, удовлетворяющих системе технических ограничений, и выделить в этом множестве оптимальное решение. Основные требования, определяющие «правильность» [5, 58, 97, 108] технологического процесса, заключаются в необходимости достижения заданных требований точности и качества изготавливаемых изделий. В качестве критерия оптимизации мы предложим, в соответствии с ранее выполненным анализом проблемы, какой-либо из критериев экономического [17, 20, 69] характера, например, себестоимость [5, 15, 75, 97, 108] обработки.

Традиционно разработку технологического процесса механической обработки рекомендуется вести в следующей последовательности: анализ объекта производства, определение типа производства и предварительный, укрупненный, выбор оборудования и оснастки, выбор исходной заготовки, анализ возможных способов формообразования отдельных поверхностей, разработка последователь-

ности обработки поверхностей заготовки, уточнение выбора оборудования, выбор технологических баз, разработка планов выполнения отдельных операций.

Устанавливают маршрут обработки отдельной поверхности, исходя из требований рабочего чертежа и характеристик принятой заготовки. По заданному качеству точности и шероховатости поверхности с учетом размера, массы и формы детали выбирают возможные методы окончательной обработки [77]. Особенности выполнения отдельных операций не позволяют дать заключение о точности обработки по аналогии с другими операциями, так как между ними не бывает всестороннего сходства. В частности, отличаются размеры и форма обрабатываемых заготовок, состояние станков, режимы обработки и другие технологические факторы. Несмотря на то, что таблицы (табл. 18) точности [100] дают только общее представление о возможной точности обработки, они необходимы как справочные данные при проектировании технологических процессов. Для упрощения мы будем рассматривать только два критерия: высоту микронеровностей, как показатель качества обработанной поверхности и номер качества – показатель точности обработки. Каждый метод обработки определяется диапазоном достижимых показателей качества и точности. Предельные значения диапазона определяются из соображений экономичности (для нижних границ) или достижимости по технологическим возможностям метода – для верхних.

**Таблица 18**  
**Пример таблицы точности обработки**

Метод обработки		Параметр шероховатости поверхности Ra, мкм	Квалитет точности
Обтачивание	обдирочное	100...50	17...14
	черновое	50...25	14...12
	получистовое или однократное	12,5...3,2	12...10
	чистовое	6,3...1,6	11...7
	тонкое	0,8...0,4	7...6
Шлифование	предварительное	1,6...0,8	8...7
	чистовое	0,8...0,4	7...6
	тонкое	0,4...0,1	5...3

Так, например, обработку поверхности с высотой микронеровностей  $Ra\ 1,6$  мкм можно выполнять чистовым точением (верхняя граница диапазона), но вероятность получения заданного качества поверхности будет недостаточно высокой – потребуется, вероятно, некоторое занижение режимов обработки, или использование резцов со специальной геометрией – что, во всяком случае, приведет к неоправданному увеличению затрат на обработку. В то же время, использование метода предварительного шлифования (нижняя граница) позволит гарантированно получить требуемое качество поверхности при минимальных затратах на обработку.

Однако, следует признать, что надежность справочных данных недостаточно высока. Исследования Б. М. Бржозовского и А. Н. Плотникова [83] подтверждают гипотезу о существенности – от 15 до 40 %, в зависимости от характера справочных величин – различий однородных данных, взятых из различных источников. Причина такого расхождения лежит, во-первых, в «отраслевой природе» применяемой справочной литературы и, во-вторых, в достоверности статистических методов, используемых при формировании справочных массивов. О возможности уточнения справочных данных мы будем говорить далее.

Кроме того, недостаточной следует признать также полноту справочной информации. Как правило, опыт инженера-технолога позволяет дополнить таблицы точности обработки сведениями о возможностях каждого метода обработки в части повышения качества обрабатываемой поверхности или точности выполняемых размеров. В настоящее время эти показатели методов обработки определяются, в зависимости от технологических традиций предприятия, эмпирически, с учетом рекомендаций справочной [13, 36, 58, 100] литературы, или, достаточно часто, при проектировании используется субъективный опыт технолога. И в одном и в другом случае вероятны ошибки технологии, выявление и исправление которых становится возможным на самых последних стадиях технологической подготовки производства. Рассмотрим технологическую цепочку из двух последовательно выполняемых переходов: чернового и получистового точения наружной цилиндриче-

ской поверхности. По данным табл. 18, в результате возможно получение поверхности с высотой микронеровностей (по Ra) от 12,5 мкм до 3,2 мкм.

$$\begin{aligned} \delta_{IT}^{\min} &= IT_i^{\min} - IT_{i-1}^{\max} \\ \delta_{IT}^{\max} &= IT_i^{\max} - IT_{i-1}^{\min} \end{aligned} \quad \text{или} \quad \delta_{Ra}^{\min} = \frac{Ra_i^{\min}}{Ra_{i-1}^{\max}}; \quad \delta_{Ra}^{\max} = \frac{Ra_i^{\max}}{Ra_{i-1}^{\min}} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \delta_{IT}^{\min} &= IT_i^{\min} - IT_{i-1}^{\min} \\ \delta_{IT}^{\max} &= IT_i^{\max} - IT_{i-1}^{\max} \end{aligned} \quad \text{или} \quad \delta_{Ra}^{\min} = \frac{Ra_i^{\min}}{Ra_{i-1}^{\min}}; \quad \delta_{Ra}^{\max} = \frac{Ra_i^{\max}}{Ra_{i-1}^{\max}} \quad (21)$$

Сравнивая вероятные значения шероховатости по правилам приближенных (20) вычислений – т. е. так, как рекомендовано выполнять расчеты по справочным исходным данным, – получим, что высота микронеровностей обработанной поверхности на последнем переходе может уменьшиться в 2...16 раз ( $9 \pm 7$ ). Однако, неформальные – сравнение проведем по отдельности (21) для верхних и для нижних границ диапазона – данные говорят, что в данном случае «улучшение» качества поверхности возможно не более чем в 4...8 раз ( $6 \pm 2$ ). Аналогичные рассуждения в отношении точности выполняемых размеров позволяют получить величину уточнения в пределах 1...3 номеров квалитетов ( $2 \pm 1$ ) против формального значения, находящегося в пределах от –1 (снижение точности) до 5 номеров квалитетов ( $2 \pm 3$ ). Очевидно, статистические данные, определенные с размахом значений, большим номинала, заслуживают некоторого недоверия. Отметим, что вопрос о достоверности справочной информации в части повышения качества (точности) изделия в процессе обработки требует дополнительного исследования.

Предположим, однако, что проблема решена. Статистически достоверные данные о повышении качества поверхности и точности выполняемых размеров (уменьшение номера квалитета точности и относительное снижение высоты микронеровностей обработанной поверхности) для каждого технологического метода получены и обоснованы. Тогда можно дополнить существующие справочные массивы этими сведениями (табл. 19). В этом случае появляется возможность применения математических методов для анализа точности обработки.

**Таблица 19**  
**Пример модифицированной таблицы точности обработки**

Метод обработки		Шероховатость		Точность	
		Ra, мкм	Улучшение	IT	Улучшение
Обтачивание	черновое	50...25	2	14...12	2...3
	получистовое или однократное	12,5...3,2	4...8	12...10	2
Шлифование	чистовое	0,8...0,4	2...4	7...6	1...4
	тонкое	0,4...0,1	2...4	5...3	2...3

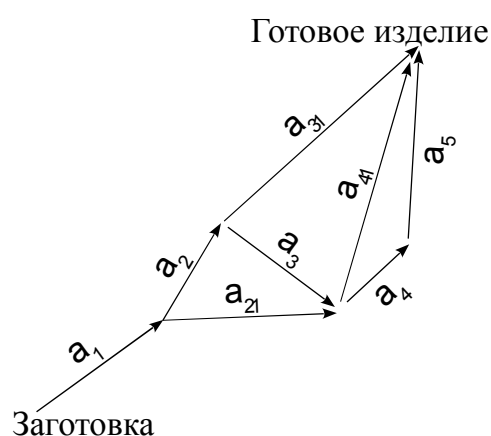
Рассмотрим пример построения сетевой модели для маршрута обработки наружной цилиндрической поверхности точностью IT 7 и высотой микронеровностей Ra 0,8...1,25 мкм. В соответствии с таблицами точности обработки можно предложить несколько равнозначных, по достижимым показателям качества изделия, вариантов обработки.

Вариант 1:	Вариант 2:	Вариант 3:	Вариант 4:	Вариант 5:
черновое точение	черновое точение	черновое точение	черновое точение	черновое точение
получистовое	получистовое	получистовое	получистовое	получистовое
точение	точение	точение	точение	точение
чистовое точение	чистовое точение	предварительное	чистовое точение	предварительное
предварительное	предварительное	шлифование		шлифование
шлифование	шлифование	чистовое		
чистовое		шлифование		
шлифование				

Представим варианты технологии в виде транспортной сети (рис. 54). Структурно-временная диаграмма сети дана в табл. 20.

**Таблица 20**  
**Сетевая модель обработки**

Метод обработки	Длина ребра	Предыдущее звено
1. Точение черновое	$a_1$	
2. Точение получистовое	$a_2$	$a_1$
	$a_{21}$	
3. Точение чистовое	$a_3$	$a_2$
	$a_{31}$	
4. Шлифование предварительное	$a_4$	$a_{21}, a_3$
	$a_{41}$	
5. Шлифование чистовое	$a_5$	$a_4$



**Рис. 54. Сетевая модель обработки**

Следует отметить, что одни и те же методы обработки, выполняемые в различной последовательности, требуют различных затрат на реализацию технологии. Так например, предварительное шлифование, выполняемое в качестве последнего перехода механической обработки (варианты 2 и 5), требует на реализацию определенных ( $a_{41}$ ) затрат, поскольку обеспечивает достижение заданных показателей качества ( $Ra\ 0,8...1,25\ \mu\text{м}$ ) и точности (IT 7) изделия. Тот же метод, выполняемый в качестве промежуточной (варианты 1 и 3) обработки, предназначен для достижения более грубых характеристик изделия и, соответственно, требует меньших ( $a_4$ ) затрат на осуществление. Такие же рассуждения применимы и к другим технологическим методам (получистовое и чистовое точение) из проектируемых планов обработки.

В зависимости от условий проектируемого производства (способ организации, серийность, принцип расстановки оборудования, приоритет экономических критериев – такт выпуска, экономичность – и т. д.) технологическая задача обеспечения требуемого качества изделия может быть сведена к одной из рассмотренных выше математических задач:

- «задача о потоке минимальной стоимости» или «задача о кратчайшем пути» – для крупносерийного производства с расстановкой оборудования по ходу технологического процесса;
- «задача о кратчайшем пути» или «задача о максимальном потоке» – для производства с жестко регламентированной производительностью;
- «задача о максимальном потоке» или «перераспределение ресурсов» – для серийного или единичного производства с расстановкой оборудования «по группам».

### **3.2. Обеспечение ритмичности производства**

Процесс технологического проектирования включает в себя как один из этапов решение задач организационно-экономического планирования – определение коэффициента загрузки оборудования по времени и расчет межоперационных заделов. Эти задачи обязательно решаются при проектировании поточного и, в осо-



бенности, прямоточного производства и, практически, не рассматриваются при проектировании обработки в условиях единичного и мелкосерийного производства с расстановкой оборудования по группам. Однако экономическая ситуация, в которой должно функционировать современное производство, такова что согласованность работы всех подразделений является одним из основных и непременных условий надежной работы предприятия в целом.

Организационно-экономическое проектирование в процессе подготовки производства предполагает решение следующих задач:

- расчет коэффициентов загрузки оборудования с учетом наличия взаимозаменяемого оборудования или технологических операций – «задача о назначениях» или «задача о перераспределении ресурсов»;
- расчет межоперационных (межцеховых и т. д.) заделов и определение площадей для хранения заделов – «задача о перераспределении ресурсов» или «задача о минимальных затратах»;
- определение оптимальных маршрутов транспортирования заготовок (готовых деталей) и перемещения изделий между рабочими местами при расстановке оборудования по группам – «задача о кратчайшем пути» или «задача о максимальном потоке»;
- расчет периодичности и моментов запуска партии изделий в производство – «задача о максимальном потоке» или «задача о кратчайшем пути», или «задача о минимальных затратах».

### **3.3. Организационно-техническое проектирование**

Вопросы автоматизации технологической цепочки от конструкторского проекта до непосредственной обработки и сборки открыты много лет. В общем случае, задачи технологической службы предприятия заключаются в проектировании производств для выпуска заданного количества комплектов определенного изделия (или группы изделий). Исходные данные для технологического проектирования представляются в виде технической (конструкторской и эксплуатационной) документации на изделие, подлежащее производству. Результаты работы техноло-

гической службы включают в себя технологическую документацию, конструкторскую документацию по нестандартному оборудованию, планировки производственных помещений и экономическое обоснование проекта производства. В процессе предпроизводственной подготовки решаются задачи технического плана, такие как проектирование технологии для основного и заготовительного производств, нормирование, оснащение основным и вспомогательным оборудованием, инструментальное обеспечение производства. Для готового производства, в процессе эксплуатации, появляются задачи технологического сопровождения, контроля качества выпускаемой продукции.

Часть задач по обеспечению работоспособности машиностроительного производства следует отнести к задачам организационного характера таким как, например, организация плановых ремонтов оборудования, занятого в производстве. При постановке оборудования на плановый, а тем более на внеплановый, ремонт возникает необходимость перераспределения загрузки работающего оборудования. Подобная задача решается и в процессе предпроизводственной подготовки – при оснащении технологического процесса основным оборудованием и при проектировании планировок и компоновок производственных помещений.

Задачи такого рода сводятся к задачам информационного поиска и традиционно решаются при помощи поисковых систем, как правило табличных или реляционных, ориентированных на обработку числовой или текстовой информации. Конструкторские проектные процедуры предполагают обработку, преимущественно, графической информации. В большинстве случаев, поисковые и конструкторские (проектные) процедуры выполняются с использованием различных, зачастую несовместимых, программных средств.

Использование гибридной информационной системы позволяет организовать хранение и обработку текстовой и графической информации таким образом, что электронные чертежи представляются в виде информационных массивов, а геометрические объекты, составляющие эти чертежи, воспринимаются системой управления базами данных в качестве «атомов», доступных для поиска по задан-

ным условиям. В этом случае информационный массив, сформированный на этапе технологического проектирования, становится информационной основой организационного сопровождения действующего производства. В числовых полях гибридной базы данных хранятся сведения об эксплуатационных характеристиках, загрузке, ремонтной сложности, сроках плановых ремонтов и т. д., а геометрические объекты дают сведения о размещении объекта в производственном помещении и относительно транспортных и технологических коммуникаций.

Входной язык гибридной ИС позволяет решать не только предусмотренные при создании ИС проектные процедуры, но и создавать новые расчетные модули, использующие текстово-графические информационные массивы в качестве исходных данных.

#### 3.3.1. Расстановка оборудования в производственных помещениях

В зависимости от формы организации производственного процесса используются [70] два принципиально разных метода решения задачи расстановки оборудования.

1. Станки расположены в порядке технологического процесса. Технологическая линия движения деталей имеет вид прямой. Оборудование расставляется в линию с учетом санитарно-технических норм. Порядок расстановки жестко задан порядком технологических операций. Степень оптимизации минимальна: существует возможность минимизировать производственные площади и оптимизировать расположение обеспечивающих станций – подачи СОЖ, воды, пара и т. п. Грузопоток между рабочими местами не учитывается.
2. Станки расположены по группам технологического оборудования. Производится оптимизация суммарного грузопотока на участке станков каждой группы.

#### 3.3.2. Минимизация производственных площадей (задача «о раскрое листового материала»)

Минимизировать площади производственных помещений можно, расставив оборудование в несколько рядов, или повернув оборудование по отношению к линии движения изделий.

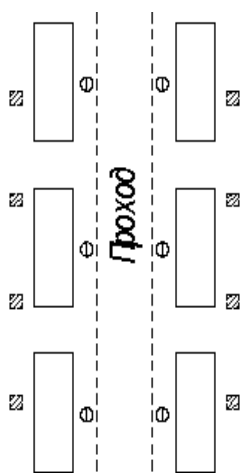


Рис. 55. Расположение станков в 2 ряда.

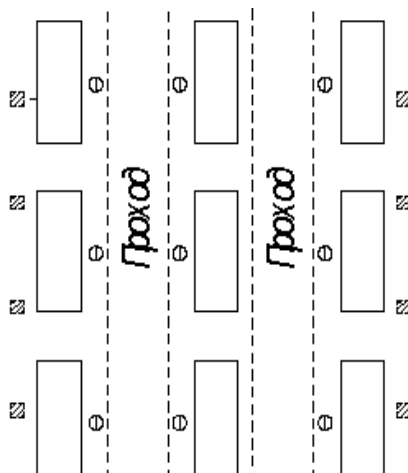


Рис. 56. Расположение станков в 3 ряда.

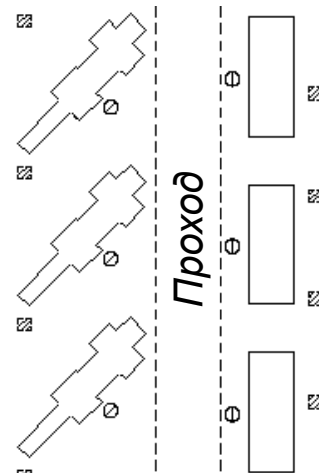


Рис. 57. Угловое расположение станков.

Станки могут располагаться в пролете цеха в два (рис. 55), три (рис. 56) и четыре ряда в зависимости от размеров станков и ширины пролета.

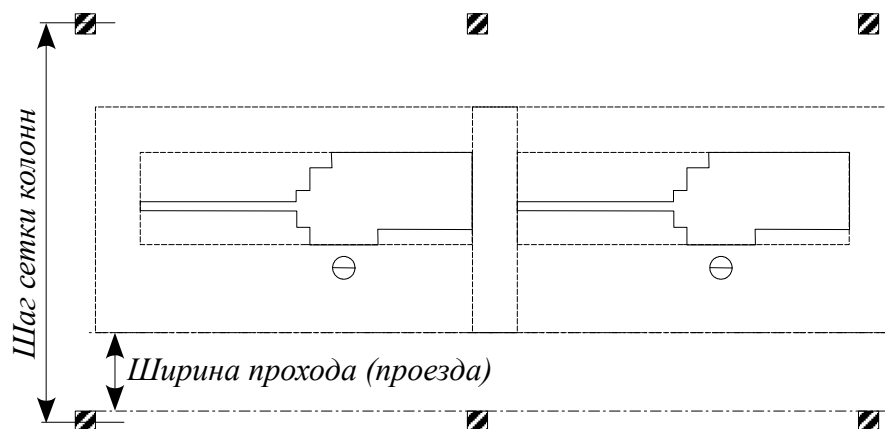


Рис. 58. Расположение станков «в линию» фронтом к проходу

Наиболее удобное и часто встречающееся расположение большинства станков – вдоль пролета (рис. 55, 56). Поперечное расположение применяется в случае, когда при этом может быть достигнуто лучшее использование площади или когда при продольном расположении получаются слишком большие, не вызванные необходимостью проходы, а большее количество рядов станков не размещается. При таком расположении для подхода к станкам оставляются поперечные проходы, которые служат для доставки деталей на тележках к рабочим местам. Поворот станка (рис. 60) на некоторый угол позволяет уменьшить общую площадь производственных помещений за счет частичного перекрытия дополнительных (рис. 59) площадей.

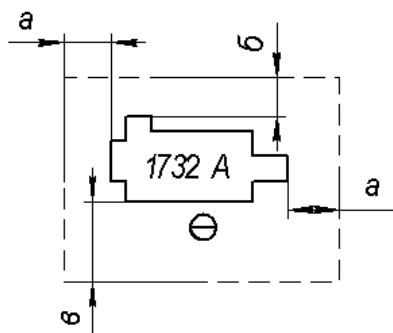


Рис. 59 Дополнительные площади

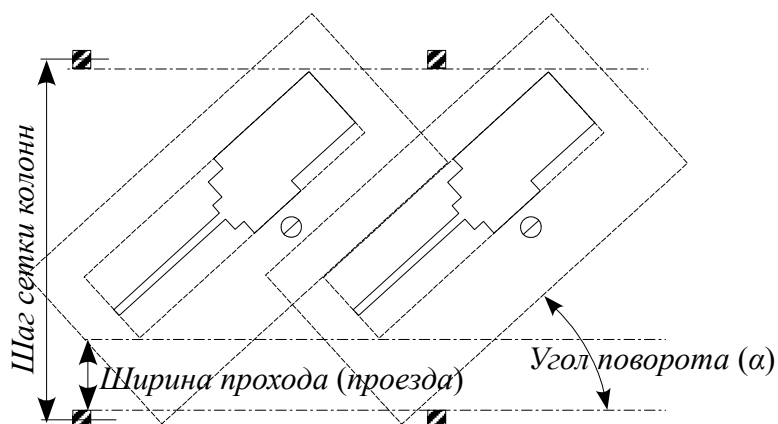


Рис. 60 Поворот станков и уменьшение площадей

Ощутимое сокращение производственных площадей заметно при величине угла поворота  $\alpha > 30^\circ$ , причем для относительно длинных (отношение длины к ширине  $> 3$ ) станков. Оценить степень оптимальности решения можно, например, по величине эффективно (рис. 61) используемой производственной площади или по удельной площади в расчете на одну единицу оборудования.

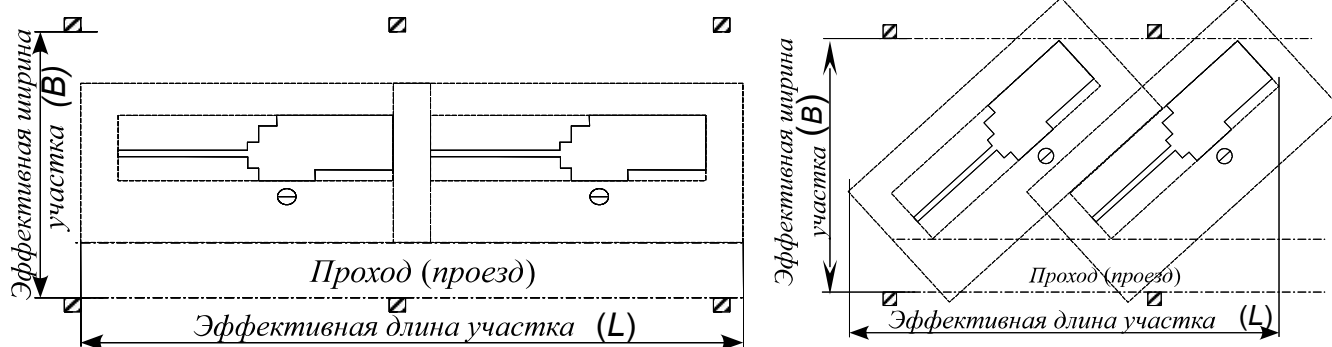


Рис. 61 Изменение эффективной площади участка при повороте станков

$$S_{\text{уд}} = \frac{B \cdot L}{N}, \quad (22)$$

где  $N$  – количество единиц оборудования, установленного на участке.

Задача размещения оборудования «по ходу технологического процесса» по способу поиска оптимального решения может считаться подобной задаче [69] «об оптимальном раскрое листового материала».

### 3.3.3. Расстановка оборудования с оптимизацией грузопотока (задача «о назначениях»)

В условиях единичного или серийного производства, как правило, применяется метод расстановки оборудования «по группам». В этом случае, в качестве основного параметра, определяющего эффективность работы участка, обычно используют грузооборот участка, характеризуемый грузопотоком  $I_{i_1 i_2}$  между рабочими местами  $i_1$  и  $i_2$ :

$$I_{i_1 i_2} = \sum_{k=1}^p N_k m_k, \quad (23)$$

где  $N_k$  – программа запуска  $k$ -го изделия;

$m_k$  – показатель загруженности потока для  $k$ -го изделия (в качестве показателя можно использовать величину трудоемкости или массу изделия);

$p$  – число деталеймаршрутов между рабочими местами  $i_1$  и  $i_2$ .

При точечном варианте расположения оборудования [2], когда перемещение деталей осуществляют со склада к рабочему месту и обратно, рабочие места с наибольшей интенсивностью грузопотока размещают ближе к складу, и наоборот.

Сложнее решить эту задачу для линейного и гнездового вариантов расположения оборудования. В качестве аналога можно рассмотреть «задачу о назначениях».

С учетом задачи «о назначениях» проблема оптимального размещения рабочих мест на участке может быть сформулирована в следующем виде: «Значения грузопотоков (23) между станками (рабочими местами), представлены в виде значений квадратной матрицы из  $n$  строк и  $n$  столбцов, где  $n$  – число рабочих мест на участке. Также известны места расположения площадок для рабочих мест и расстояния между ними. Матрица расстояний также имеет размерность  $n \times n$ ». Фактически матрицы грузопотоков и расстояний являются аналогами матрицы смежности, в которой, вместо логических величин, определяющих наличие ребра между вершинами графа, записаны соответствующие значения.

В качестве допустимого множества площадок обычно берут узлы прямоугольной или треугольной решетки или фиксированные точки на плоскости. Надо расположить рабочие места по узлам решетки или в точках плоскости таким образом, чтобы мощность грузопотока  $\Theta$ , определяемая суммой произведений грузопотоков на соответствующие расстояния, была минимальной:

$$\Theta = \sum_{i_1} \sum_{i_2} \sum_{j_1} \sum_{j_2} x_{i_1 j_1} x_{i_2 j_2} I_{i_1 i_2} S_{j_1 j_2} \rightarrow \min. \quad (24)$$

где  $x_{i_1 j_1}$  – булева переменная, показывающая, размещено ли  $i_1$ -е рабочее место на  $j_1$ -й площадке;  $x_{i_2 j_2}$  – переменная, показывающая, размещено ли  $i_2$ -е рабочее место на  $j_2$ -й площадке;  $I_{i_1 i_2}$  – величина грузопотока с  $i_1$ -го рабочего места на  $i_2$ -е;  $S_{j_1 j_2}$  – расстояние между  $j_1$  и  $j_2$ -й площадками.

В записи целевой функции произведение логических величин  $x_{i_1 j_1} \cdot x_{i_2 j_2}$  определяет факт передачи изделия с рабочего места  $i_1$ , размещенного на площадке  $j_1$ , на рабочее место  $i_2$ , размещенное на площадке  $j_2$ . Нетрудно убедиться, что значение произведения  $x_{i_1 j_1} \cdot x_{i_2 j_2} = 1$  только в этом случае. Это произведение аналогично признаку назначения  $x_{ij}$  в задаче (19). Произведение  $I_{i_1 i_2} S_{j_1 j_2}$ , определяющее грузооборот между рабочими местами, фактически соответствует величине затрат  $c_{ij}$  в задаче «о назначениях».

Ограничения на решение задачи расстановки оборудования запишем в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{i_a j_b} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \\ \sum_{j_b=1}^n x_{i_a j_b} = 1, \\ \sum_{i_a=1}^n x_{i_a j_b} = 1, \end{array} \right. \text{ для всех } \left\{ \begin{array}{l} i \\ j \end{array} \right\} \in [1, n]; \quad \left\{ \begin{array}{l} a \\ b \end{array} \right\} \in [1, 2]. \quad (25)$$

Следует отметить, что использование переборных алгоритмов для решения задачи расстановки оборудования возможно лишь при достаточно малом количестве рабочих мест. Это связано с усложнением задачи по сравнению с аналогом – если задача о назначениях может рассматриваться как «плоская», поскольку ис-

ходные данные представлены в виде одной матрицы, – то рассмотренная в настоящем разделе задача является трехмерной – в исходных данных фигурируют две матрицы одинаковой размерности  $n \times n$ .

### 3.3.4. Оптимальное распределение оборудования

Оборудование  $m$  различных видов нужно распределить между рабочими участками. Производительность одной единицы оборудования  $i$ -го вида на  $j$ -рабочем участке равна  $P_{ij}$ ;  $i=1...m, j=1...n$ . Потребность  $j$ -го участка в оборудовании составляет  $b_j, j=1...n$ . Запас оборудования  $i$ -го вида равен  $a_i, i=1...m$ . Найти распределение оборудования на рабочие участки, при котором суммарная производительность максимальна.

Данная задача относится к классу транспортных задач при условии, что производительность линейно зависит от количества используемого оборудования. Поставщиками в задаче являются различные виды оборудования, потребителями – рабочие участки. Предложение определяется запасом оборудования каждого вида, спрос – потребностью в нем на рабочем участке.

$$\begin{aligned}
 P = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} x_{ij} \rightarrow \max \\
 \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i & i = \overline{1, m} \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j & j = \overline{1, n} \\ \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \\ x_{ij} \geq 0 & \begin{array}{l} i = \overline{1, m} \\ j = \overline{1, n} \end{array} \end{array} \right. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Обозначим через  $x_{ij}$  количество единиц оборудования  $i$ -го вида, выделенное на  $j$ -й рабочий участок,  $i=1...m, j=1...n$ . Математическая модель задачи (26) является сбалансированной, то есть задача относится к классу закрытых задач линейного программирования. В данной задаче требуется максимизировать суммарную производительность, представленную целевой функцией  $P$ . Для перехода к стан-



дартной форме задач линейного программирования необходимо заменить функ-

цию  $P$  на противоположную  $P' = -P = -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} x_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (-P_{ij}) x_{ij}$ , которую

нужно будет минимизировать  $P' \rightarrow \min$ . При решении в транспортной таблице вместо затрат на перемещение запишутся производительности  $P_{ij}$ , взятые с противоположным знаком.

### **3.4. Возможность комплексного решения задач технологической подготовки и технологического обеспечения производства**

#### **3.4.1. Типовое технологическое проектирование**

В последнее время прогресс компьютерных технологий позволил не только теоретически обсуждать саму проблему, но и начать решать ее. Основная задача сегодня – автоматизация работы специалиста [81] путем применения систем автоматизированного проектирования и, в дальнейшем, объединение в единую систему процессов разработки конструкторской и технологической документации, обработки деталей и сборки готового изделия. Такой подход возможен при использовании понятия «электронная модель изделия».

Рассмотрим [110] комплексный анализ возможности автоматизированного построения технологического процесса исходя из антропометрических и иных технологических особенностей детали типа «рычаг». В результате анализа конструкций [49] и технологических процессов [101] изготовления деталей названного класса определен перечень составных элементов детали, позволяющий построить электронную модель в виде текстово-графической информационной системы. Каждому из типовых элементов сопоставлены методы обработки и доступные схемы базирования, определяемые в зависимости от технических требований на сам элемент и его расположение относительно базовых частей рычага.

Разработанная система позволяет «соединять» отдельные элементы, представленные в классификаторе (прил. 2) с целью получения эскизного, а впоследствии, рабочего чертежа детали, при этом используется не комплексная модель, не

позволяющая полностью охватить все возможные «рычаги» ввиду их разнообразия, а полноценная деталь.

### 3.4.2. Возможность алгоритмизации построения маршрутных технологических процессов

Сравнение списков возможных вариантов обработки с табличными и сетевыми моделями тех же самых данных показывает, что современные алгебраические структуры [8, 9, 63] позволяют сделать представление данных более компактным с точки зрения хранения и более информативным с точки зрения использования для выполнения последующих расчетов. Так, в сетевой модели можно учесть величины затрат (энергетических, временных, материальных) на обработку, которые определяются в зависимости от вида выполняемой обработки (как в традиционном проектировании) и в зависимости от всех ранее выполненных и последующих технологических операций.

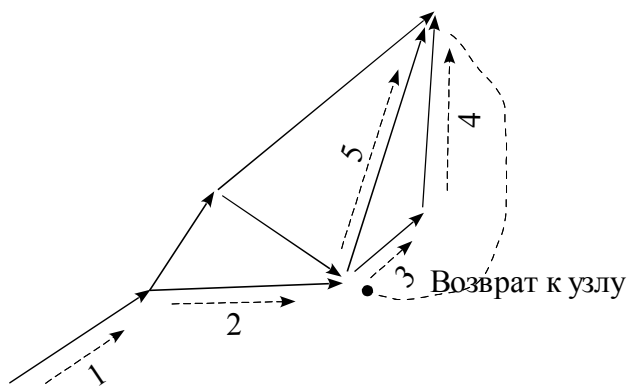


Рис. 62. Схема обхода сети при поиске «в глубину»

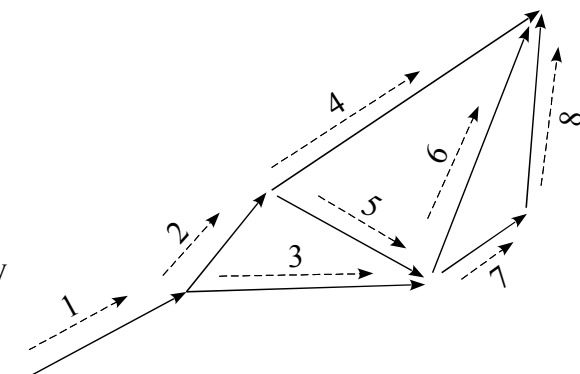


Рис. 63. Схема обхода сети при поиске «в ширину»

В структурно-временной таблице (табл. 20) явно показано, что величина затрат на выполнение, например, чистового точения различна ( $a_3 \neq a_{31}$ ) и зависит от условий выполнения предшествующей (получистовое точение) и последующей (шлифование или завершение процесса) обработки. Использование сетевых алгебраических структур позволяет применить для проектирования последовательности обработки алгоритмы [35, 60, 76] дискретной математики такие как, например, алгоритмы [76] обхода графа «в глубину» (рис. 62) или в ширину (рис. 63).

Рассмотрение процесса формирования изделия с заданными свойствами в виде транспортного – перемещения объекта технологического процесса между

узлами сети в виртуальной системе координат – позволяет применить для математического описания процесса алгоритмическую структуру, представляющую собой взвешенный ориентированный граф с одним «исток» и одним «сток» – «транспортную сеть». В этом случае индивидуальное технологическое проектирование формализуется с использованием методов линейного программирования.

Рассмотрение процесса маршрутного технологического проектирования, как процесса реляционной информационной системы позволяет применить математические методы теории множеств для решения технологических задач методами группового и типового проектирования. Единой базой для формализации задач технологического проектирования и построения алгоритмов автоматизированного технологического проектирования могут быть методы дискретной математики – теория множеств, линейное программирование, комбинаторика.

## Список использованной литературы

1. Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – М. : Высш. шк., 1994. – 544 с.
2. Андерс, А. А. Проектирование заводов и механосборочных цехов в автотракторной промышленности / А. А. Андерс, И. М. Потапов. – М. : Машиностроение, 1982. – 271 с.
3. Ахо, А. Структуры данных и алгоритмы / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М. – СПб. – Киев : BHV, 2000.
4. Базров, Б. М. Расчет точности машин на ЭВМ / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 1984. – 296 с.
5. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М. : Машиностроение. – 1969. – 599 с.
6. Балакшин, Б. С. Теория и практика технологии машиностроения / Б. С. Балакшин / В 2 кн. – М. : Машиностроение, 1982.
7. Белов, М. А., Размерный анализ технологических процессов обработки заготовок / М. А. Белов, А. Н. Унянин; под общ. ред Л. В. Худобина. – Ульяновск : УлГТУ, 1997. – 148 с.
8. Белоусов, А. И. Лекции по дискретной математике / А. И. Белоусов, Б. В. Мартынов, А. Н. Щетинин. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 1994. – 96 с.
9. Богомолов, А. М. Алгебраические основы теории дискретных систем / А. М. Богомолов, В. Н. Салий. – М. : Наука, 1997. – 368 с.
10. Браилов, И. Г. Автоматизация расчета распределения припуска на обработку детали при изменении ее положения в теле заготовки / И. Г. Браилов, М. Н. Одинец // Динамика систем, механизмов и машин (Материалы IV Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию ОмГТУ). – Омск : ОмГТУ, 2002. – С. 328.
11. Брук, С. И. Размерные расчеты в специальном машиностроении / С. И. Брук, Б. И. Лившиц. – Л. : Машгиз, 1946. – 196 с.

12. Вагнер, Г. Основы исследования операций / Г. Вагнер / В 3 книгах. – М. : Мир, 1973.
13. Васильев, А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А. С. Васильев, А. М. Дальский, Ю. М. Золотаревский, А. И. Кондаков; под ред. А. И. Кондакова. – М. : Машиностроение, 2005. – 352 с.
14. Васильков, Ю. В. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании / Ю. В. Васильков, Н. Н. Василькова. – М. : Финансы и статистика, 2004.
15. Великанов, К. М. Определение экономической эффективности вариантов механической обработки деталей / К. М. Великанов. – Л. : Машиностроение, 1980. – 240 с.
16. Вирт, Н. Алгоритмы и структуры данных / Н. Вирт. – Спб. : ПИТЕР, 2001. – 352 с.
17. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М. : Мир, 1985
18. Глухов, В. И. Метрологическое обеспечение технической документации : учеб. пособие / В. И. Глухов. – Омск : Изд-во ОмПИ, 1988. – 83 с.
19. Горнев, В. Ф. Компьютерная интеграция и интеллектуализация производств на основе их унифицированных моделей / В. Ф. Горнев, В. Б. Ковалевский. – Программные продукты и системы, 1998. – № 3. – С. 12 – 19.
20. Горнев, В. Ф. Проблемы и технология комплексной автоматизации / В. Ф. Горнев // Автоматизация проектирования. – 1998. – № 4 (10). – С. 40 – 44; – 1999. – № 1 (11). – С. 28 – 36.
21. Горнев, В. Ф. Унификация построения математических моделей КИП / В. Ф. Горнев // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 1995. № 3, С. 4 – 11.
22. ГОСТ 14.301-83. ЕСТПП. Общие правила разработки технологических процессов. – М. : Изд-во стандартов, 1983.

23. ГОСТ 14.402–83. ЕСТПП. Автоматизированная система технологической подготовки производства. Состав и порядок разработки. – М. : Изд-во стандартов, 1983.
24. ГОСТ 14.416–83. ЕСТПП. Организация автоматизированного технологического проектирования. – М. : Изд-во стандартов, 1983.
25. ГОСТ 2.101–68. Единая система конструкторской документации. Виды изделий. – М. : Изд-во стандартов, 1968.
26. ГОСТ 21495–76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1976.
27. ГОСТ 23501.101 – 87. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1987.
28. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1982.
29. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М. : Изд-во стандартов, 1973.
30. ГОСТ 3.1001–81. ЕСТД. Общие положения. – М. : Изд-во стандартов, 1981.
31. ГОСТ 3.1102–81. ЕСТД. Стадия разработки и виды документов. – М. : Изд-во стандартов, 1981.
32. ГОСТ 3.1109–82. ЕСТД. Термины и определения основных понятий. – М. : Изд-во стандартов, 1982.
33. ГОСТ 3.1118–82. ЕСТД. Формы и правила оформления маршрутных карт. – М. : Изд-во стандартов, 1982.
34. ГОСТ 3.1702–79. ЕСТД. Правила записи операций и переходов. – М. : Изд-во стандартов, 1979.
35. Гудман, С. Введение в разработку и анализ алгоритмов / С. Гудман, С. Хидетниemi. – М. : Мир, 1981
36. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 1975. – 223 с.

37. Допуски и посадки: справочник в 2 т. / под ред. В. Д. Мягкова, М. А. Палей, А. Б. Ломарев, В. А. Брагинский. – Л. : Машиностроение, 1983.
38. Дубова, Н. Автоматизация: от идеи до утилизации / Н. Дубова // <http://www.osp.ru/>. – 2003. – № 6.
39. Дунаев, П. Ф. Размерные цепи / П. Ф. Дунаев. – М. : Машгиз, 1963. – 308 с.
40. Евгениев, Г. Б. Основы компьютеризации инженерных знаний / Г. Б. Евгениев – М. : МГТУ, 1998. – 75 с.
41. Евгениев, Г. Б. Цели автоматизации проектирования и средства их реализации в системе СПРУТ / Г. Б. Евгениев, А. А. Крючков – Информационные технологии. – 1997. – № 4.
42. Евстигнеев, В. А. Применение теории графов в программировании / В. А. Евстигнеев. – М. : Наука, 1985. – 352 с.
43. Егоров, М. Е. Основы проектирования машиностроительных заводов / М. Е. Егоров. – М. : Высшая школа, 1969. – 480 с.
44. Емельянов, В. В. Модели в задачах анализа и управления сложными системами и процессами / В. В. Емельянов // Компьютерная хроника. – 1999. – № 3. – С. 51 – 69.
45. Емельянов, В. В. Введение в интеллектуальное имитационное моделирование. Язык РДО / В. В. Емельянов, С. И. Ясиновский. – М. : АНВИК, 1998. – 428 с.
46. Иващенко, И. А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации / И. А. Иващенко. – М. : Машиностроение, 1975. – 222 с.
47. Информационно-вычислительные системы в машиностроении. CALS-технологии / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, В. В. Павлов, А. В. Рыбаков. – М. : Наука, 2003. – 292 с.
48. Калачев, О. Н. Интерактивное моделирование размерных изменений заготовки при проектировании технологического процесса механической обработки / О. Н. Калачев // Информационные технологии. – 2001. – №2. – С. 10-14.
49. Классификатор ЕСКД. – М : Изд-во стандартов, 1991.

50. Классификатор технологических операций в машиностроении и приборостроении. Ч. I. – М : Изд-во стандартов, 1975.
51. Классификатор технологических переходов машиностроения и приборостроения. – М. : Изд-во стандартов, 1990
52. Кнут, Д. Искусство программирования для ЭВМ. Основные алгоритмы / Д. Кнут. – М. : Мир, 1976.
53. Ковалевский, В. Б. СПРУТ-технология: система, отличная от других. / В. Б. Ковалевский. – Компьютер Пресс. – 1997. – № 5.
54. Кован, В. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / В. М. Кован, В. С. Корсаков, А. Г. Косилова [и др.]. – 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Машиностроение, 1977. – 416 с.
55. Кован, В. М. Расчет припусков на обработку в машиностроении / В. М. Кован. – М. : Машгиз. – 1953.
56. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения: учебник для машиностроит. спец. вузов / И. М. Колесов. – 2-е изд., испр. – М. : Высш. шк. 1999. – 591 с.
57. Комиссаров, В. И. Точность, производительность и надежность в системе проектирования технологических процессов / В. И. Комиссаров, В. И. Леонтьев. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
58. Корсаков, В. С. Точность механической обработки / В. С. Корсаков. – М. : Машиностроение, 1978. – 250 с.
59. Косилова, А. Г. Точность обработки, заготовки и припуска в машиностроении: справочник технолога / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, М. А. Калинин. – М. : Машиностроение, 1976. – 288 с.
60. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход: пер. с англ. / Н. Кристофидес. – М. : Мир, 1978. – 432 с.
61. Крючков, А. А. Вопросы комплексной автоматизации предприятий / А. А. Крючков, А. И. Лазебник // Компьютер пресс. – 1997. – № 7.



62. Кузнецов, О. П. Дискретная математика для инженеров / О. П. Кузнецов, Г. М. Адельсон-Вельский. – М. : Энергия, 1988.
63. Лекции по теории графов / А. А. Емеличев, О. И. Мельников, В. И. Сарванов. – М. : Наука; главная ред. физ.-мат. лит., 1990. – 384 с.
64. Логика, алгебра и базы данных / Грэй Питер.; Пер. с англ. Килова Х. И., Минца Г. Е.; под ред. Орловского Г. В., Слисенко А. О. – М. : Машиностроение, 1989. – 359 с.
65. Мартин, Дж. Организация баз данных в вычислительных системах. Изд. второе, дополн.; пер. с англ. чл.-корр. АН УССР А. А. Стогния, А. Л. Щёрса. – М. : Мир, 1980. – 662 с.
66. Масыгин, В. Б. Метод расчета линейных технологических размеров на основе матричного представления графа / В. Б. Масыгин // Технология машиностроения. – 2004. – № 2. – С. 35 – 40.
67. Масыгин, В. Б. Проблемы технологического размерного анализа – новые материалы и технологии в машиностроении //Сб. науч. трудов по итогам Международной научно-технической конференции. Вып. 6. – Брянск: БГИТА, 2006. – С. 48 – 51.
68. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 512 с.
69. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – М. : Наука, 1961.
70. Мельников, Г. Н. Проектирование механосборочных цехов: учебник для вузов / Г. Н. Мельников; под ред. проф. Дальского А. М. – М. : Машиностроение, 1990. – 352 с.
71. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства / С. П. Митрофанов.– Т. 1 и 2. – Л. : Машиностроение, 1983.
72. Мордвинов, Б. С. Исследование геометрических структур с применением теории графов / Б. С. Мордвинов // Изв. вузов. Машиностроение, 1965.– № 3. – С. 111 – 118.

73. Мордвинов, Б. С. Расчет линейных технологических размеров и допусков при проектировании технологических процессов механической обработки / Б. С. Мордвинов, Л. Е. Яценко, В. Е. Васильев; Иркутский госуниверситет. – Иркутск, 1980. – 104 с.
74. Мосталыгин, Г. П. Технология машиностроения / Г. П. Мосталыгин, Н. Н. Толмачевский. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
75. Никифоров, А. Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения / А. Д. Никифоров. – М. : Высш. шк., 2006. – 392 с.
76. Новиков, Ф. А. Дискретная математика для программистов / Ф. А. Новиков – СПб. : Питер. – 2000. – 304 с.
77. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм [и др.]. - М. : Машиностроение, 1988. – 736 с.
78. Овсянников, М. В. Глава семьи информационных CALS-стандартов ISO 10303 STEP / М. В. Овсянников, П. С. Шильников // Компьютер Пресс. – 1997. – № 11. – С. 76 – 82.
79. Овсянников, М. В. Система электронной документации CALS – реальное воплощение виртуального мира. / М. В. Овсянников, П. С. Шильников // Компьютер Пресс. 1997. – № 8. – С. 88 – 91.
80. Ойхман, Е. Г. Реинжиниринг бизнеса: реинжиниринг организаций и информационные технологии / Е. Г. Ойхман, Э. В. Попов. – М. : Финансы и статистика, 1997. – 336 с.
81. Оробинский, В. М. Повышение эффективности лезвийной и абразивной обработки / В. М. Оробинский, А. И. Курченко, Ю. Л. Чигиринский // Наука-производству. – 2000. – № 3.
82. Основы технологии машиностроения / под ред. В. С. Корсакова. – М. : Машиностроение, 1977. – 416 с.
83. Плотников, А. Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования на основе опе-

ративной информации о свойствах инструмента и детали: дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Плотников А. Л. – Саратов, 2001.

84. Проектирование технологии: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Машиностроение, 1990. – 416 с.
85. Пузанова, В. П. Размерный анализ и простановка размеров в рабочих чертежах / В. П. Пузанова. – М.-Л. : Машгиз, 1958. – 196 с.
86. Р 50–54–76–88. ЕСТД. Правила записи операций и переходов. – М. : Изд-во стандартов, 1988.
87. Размерный анализ технологических процессов / В. В. Матвеев, М. М. Тверской, Ф. И. Бойков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1982. – 264 с.
88. РД 50-680-88. Методические указания. Автоматизированные системы. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1988.
89. Рекомендации по технологической классификации сборочных единиц общемашиностроительного применения на базе Классификатора. – М. : ВНИИ-МАШ, 1990.
90. РС 3951–73. Волнистость поверхности. Термины, определения и параметры. – Постоянная Комиссия по сотрудничеству в области стандартизации. – Прага, 1973.
91. Рудяк, В. Я. Математические модели природных явлений и технологических процессов. – В 2 ч. / В. Я. Рудяк. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – Ч. 1. – 181 с.
92. Савинов, А. М. Совмещенное проектирование на базе интегрированной инструментальной программной среды и единой модели «объект – процесс – среда» / А. М. Савинов, Б. В. Кузьмин // Программные продукты и системы. 1998. – № 3. – С. 38 - 41.

93. САПР в технологии машиностроения: учебное пособие / В. Г. Митрофанов, О. Н. Калачев, А. Г. Схиртладзе [и др.]. – Ярославль : Яросл. гос. техн. ун-т, 1995. – 298 с.
94. САПР изделий и технологических процессов в машиностроении / Р. А. Аллик, А. Г. Бурин [и др.]; под общ. ред. Р. А. Аллика. – Л. : Машиностроение, – 1986. – 319 с.
95. Сметанин, Ю. М. Методические указания для проведения размерного анализа техпроцессов с использованием графов / Ю. М. Сметанин, А. В. Трухачев; Устиновский механический институт. – Устинов , 1987. – 43 с.
96. Смирнов, А. В. Совмещенное проектирование: необходимость, проблемы внедрения, перспективы / А. В. Смирнов, Р. М. Юсупов/ – СПб. : СПИИРАН, 1992.
97. Соколовский, А. П. Научные основы технологии машиностроения. – М.–Л. : Машгиз, 1955. – 515 с.
98. Солонин, И. С. Расчеты сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980.– 110 с.
99. Сольнищев, Р. И. Система автоматизации проектирования – инструментарий проектировщика // ЭВМ в проектировании и производстве / под ред. Г. В. Орловского. – Л. : Машиностроение. – 1983.
100. Справочник технолога машиностроителя. В 2 томах. Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова.. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с.
101. Справочник технолога машиностроителя. В 2 томах. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
102. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 2002. – 684 с.
103. Тарасов, В. Б. Концепция МЕТАКИП: от компьютерно-интегрированного производства к INTERNET/INTRANET-сетям предприятий / В. Б. Тарасов // Программные продукты и системы. – 1998. – № 3. – С. 19 – 22.

104. Технологическая классификация сборочных единиц общемашиностроительного применения на базе Классификатора ЕСКД / Б. С. Мендриков, С. Л. Таллер, С. И. Разевский [и др.]. (Р-54–306–90). – М. : ВНИИМАШ, 1990.
105. Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. – М. : Изд-во стандартов, 1987.
106. Точность и производственный контроль в машиностроении: справочник / И. И. Балашкина, А. К. Кутай, Б. М. Сорочкин [и др.]; под общ. ред. А. К. Кутая, Б. М. Сорочкина. – Л. : Машиностроение, 1983.
107. Хармац, И. КОМПАС-АВТОПРОЕКТ: точный контроль над технологической информацией. Новые модули и новые возможности системы / И. Хармац // САПР и графика. – 2004, Июнь. – С. 17 – 19.
108. Худобин, Л. В. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие для машиностр. спец. вузов / Л. В. Худобин, В. Ф. Гурьянин, В. Р. Барзин. – М. : Машиностроение, 1989
109. Чарнко, Д. В. Основы проектирования механосборочных цехов / Д. В. Чарнко, Н. Н. Хабаров. – М. : Машиностроение, 1975. – 295 с.
110. Чигиринский, Ю. Л. Использование электронной модели детали для автоматизации маршрутного проектирования / Ю. Л. Чигиринский, Ю. М. Быков [и др.]. – В сб. Фундаментальные и прикладные исследования – производству. – Барнаул, 2001.
111. Чигиринский, Ю. Л. Методы дискретной математики в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский, Н. Д. Гожева, Е. Г. Радченко // Изв. ВолгГТУ. – Волгоград, 2007.
112. Яблонский, С. В. Введение в дискретную математику / С. В. Яблонский. – М. : Высш. шк., 2002.
113. Gornev, V. F. Virtual enterprises: reasons, sources and tools. / V. F. Gornev, V. B. Tarassov, R. Soenen, C. Tahon – Preprints of IFAC/IFIP Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL-97, Campinas, SP, Brazil, August 31-September 3, 1997). – P. 53 – 58.

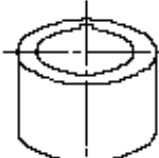
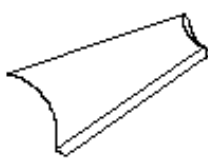
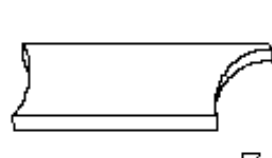

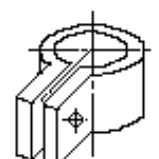
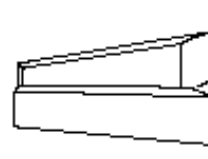
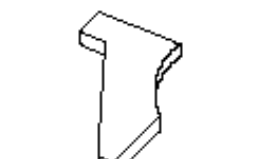

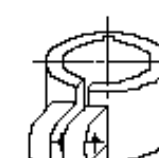
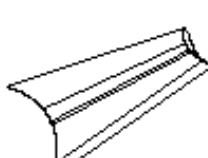


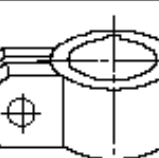

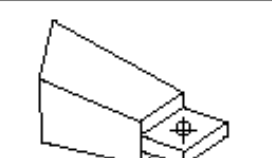

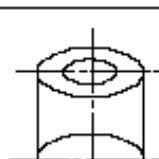

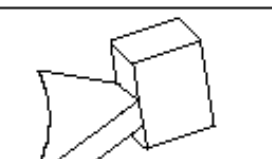
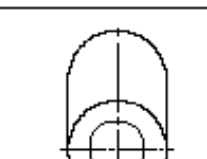
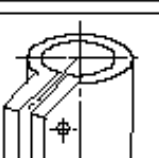
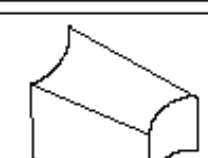
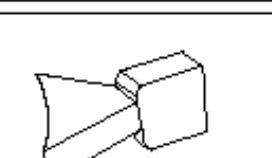
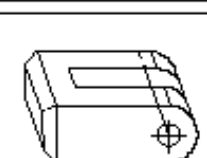
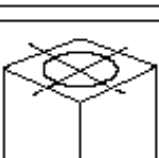



## Приложение 1

### Список сокращений

CALS	Computer Aided Life-cycle System – комплексная компьютеризация инженерной деятельности на всех этапах жизненного цикла изделий.
CASE	Computer Aided Software Engineering – совокупность программных средств, поддерживающих процессы создания и сопровождения ИС, включая анализ и формулировку требований, проектирование прикладного ПО и баз данных, генерацию кода, тестирование, документирование, обеспечение качества, конфигурационное управление и управление проектом. CASE-средства вместе с системным ПО и техническими средствами образуют полную среду разработки ИС.
EPD	Electronic Product Definition – электронная модель изделия – формализованное описание конструкторско-технологических параметров изделия для использования в автоматизированных проектных системах.
RAD	Rapid Application Development – технология проектирования программного обеспечения (ПО). Предполагает циклическое уточнение требований заказчика и корректировку программного продукта по мере разработки ПО. Позволяет сократить время от заказа на разработку до внедрения ПО.
АПС	Автоматизированная производственная система.
АСПП	Автоматизированная система подготовки производства.
АСУП	Автоматизированная система управления производством.
ВП	Виртуальное предприятие – совокупность организационно самостоятельных предприятий или подразделений одного предприятия, связанных общими информационными потоками.
ГПС	Гибкая производственная система – переналаживаемая автоматизированная производственная система, в которой реализована комплексная автоматизация как информационных, так и материальных потоков на уровне производственного участка, линии, ячейки.
ЖЦИ	Жизненный цикл изделия.

ИС	Информационная система.
ИИС	Интеллектуальная интегрированная система.
ИПМ	Инструментальная программная метасистема.
ИСА	Интегрированная система автоматизации.
ИТИ	Информационные технологии инжиниринга.
КИП	Компьютерно-интегрированные производства.
КТР	Конструкторско-технологическое решение. Комплексное решение, реализованное в конкретном изделии, в котором определяются значения конструктивных параметров изделия и оптимальный технологический процесс получения этих параметров.
ПДП	Производственная деятельность предприятия.
ПМК	Программно-методический комплекс.
ПО	Программное обеспечение.
ПС	Производственная система.
ПСК	Производственно-строительный комплекс.
ПТК	Производственно-технологический комплекс.
ПФМ	Программно-функциональный модуль.
ПЦИ	Производственный цикл изделия.
РДО	«Ресурсы-Действия-Операции». Языковая среда для построения имитационных моделей функционирования сложных технических систем.
САПР	Система Автоматизированного Проектирования. Состав и назначение САПР определяются ГОСТ 23501.101–87 и методическими указаниями РД 50-680-88.
СОУ	Система оперативного управления.
СПРУТ	«Система Проектирования Унифицированных Технологий». Инструментальный комплекс для построения предметных САПР.
ТС	Технологическая система. Разработанная параллельно с конструкцией изделия сквозная, комплексно спроектированная технология, основанная на конструкторско-технологических решениях.

**Приложение 2**  
**Пример классификации типовых элементов детали**

База	Иные элементы		
 1	 2	 3	 4
 5	 6	 7	 8
 9	 10	 11	 12
 13	 14	 15	 16
 17	 18	 19	 20
 21	 22	 23	 24
 25	 26	 27	 28



### Приложение 3

## Протокол решения задачи о минимальных затратах

$$Cff(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{23}, x_{24}, x_{34}) = 2x_{01} + 5x_{02} + 3x_{03} + 1x_{12} + 4x_{13} + 6x_{14} + 2x_{23} + 1x_{24} + 2x_{34}$$

$$\begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Given

$$\begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{34} \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} x_{01} + x_{02} + x_{03} &= 5 \\ -x_{01} + x_{12} + x_{13} + x_{14} &= 0 \\ -x_{02} - x_{12} + x_{23} + x_{24} &= 0 \\ -x_{03} - x_{13} - x_{23} + x_{34} &= 0 \\ -x_{14} - x_{24} - x_{34} &= -5 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{34} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \\ 4 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{34} \end{pmatrix} = \text{Minimize}(Cff, x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{23}, x_{24}, x_{34})$$

$$\begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$Cff(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{23}, x_{24}, x_{34}) = 32$$

## Приложение 4

### Протокол решения задачи коммивояжера

$Cff(x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}, x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}, x_{35}, x_{41}, x_{42}, x_{43}, x_{44}, x_{45}, x_{51}, x_{52}, x_{53}, x_{54}, x_{55}) :=$   
 $0x_{11} + 17x_{12} + 10x_{13} + 15x_{14} + 17x_{15} + 18x_{21} + 0x_{22} + 6x_{23} + 12x_{24} + 20x_{25} + 12x_{31} + 5x_{32} + 0x_{33} + 14x_{34} +$   
 $19x_{35} + 12x_{41} + 11x_{42} + 15x_{43} + 0x_{44} + 7x_{45} + 16x_{51} + 21x_{52} + 18x_{53} + 6x_{54} + 0x_{55}$

$$\begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{35} \\ x_{41} \\ x_{42} \\ x_{43} \\ x_{44} \\ x_{45} \\ x_{51} \\ x_{52} \\ x_{53} \\ x_{54} \\ x_{55} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Given

$$\begin{pmatrix} x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{21} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{34} \\ x_{35} \\ x_{41} \\ x_{42} \\ x_{43} \\ x_{45} \\ x_{51} \\ x_{52} \\ x_{53} \\ x_{54} \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{22} \\ x_{33} \\ x_{44} \\ x_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{51} \\ x_{12} + x_{32} + x_{42} + x_{52} \\ x_{13} + x_{23} + x_{43} + x_{53} \\ x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{54} \\ x_{15} + x_{25} + x_{35} + x_{45} \\ x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} \\ x_{21} + x_{23} + x_{24} + x_{25} \\ x_{31} + x_{32} + x_{34} + x_{35} \\ x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{45} \\ x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{12} + x_{21} \\ x_{13} + x_{31} \\ x_{14} + x_{41} \\ x_{15} + x_{51} \\ x_{23} + x_{32} \\ x_{24} + x_{42} \\ x_{25} + x_{52} \\ x_{34} + x_{43} \\ x_{35} + x_{53} \\ x_{45} + x_{54} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}
x11 \\
x12 \\
x13 \\
x14 \\
x15 \\
x21 \\
x22 \\
x23 \\
x24 \\
x25 \\
x31 \\
x32 \\
x33 \\
x34 \\
x35 \\
x41 \\
x42 \\
x43 \\
x44 \\
x45 \\
x51 \\
x52 \\
x53 \\
x54 \\
x55
\end{pmatrix}
:= \text{Minimize}(\text{Cff}, x11, x12, x13, x14, x15, x21, x22, x23, x24, x25, x31, x32, x33, x34, x35, x41, x42, x43, x44, x45, x51, x52, x53, x54, x55)$$

$$\begin{pmatrix}
x11 & x12 & x13 & x14 & x15 \\
x21 & x22 & x23 & x24 & x25 \\
x31 & x32 & x33 & x34 & x35 \\
x41 & x42 & x43 & x44 & x45 \\
x51 & x52 & x53 & x54 & x55
\end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
1 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{pmatrix}$$

$$\text{Cff}(x11, x12, x13, x14, x15, x21, x22, x23, x24, x25, x31, x32, x33, x34, x35, x41, x42, x43, x44, x45, x51, x52, x53, x54, x55) = 50$$

## Приложение 5

### Протокол решения задачи о максимальном потоке

$$Cf1(x01, x02, x03, x12, x13, x14, x23, x24, x34) = x01 + x02 + x03$$

$$Cf2(x01, x02, x03, x12, x13, x14, x23, x24, x34) = x14 + x24 + x34$$

$$\begin{pmatrix} x01 \\ x02 \\ x03 \\ x12 \\ x13 \\ x14 \\ x23 \\ x24 \\ x34 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Given

$$\begin{pmatrix} x01 \\ x02 \\ x03 \\ x12 \\ x13 \\ x14 \\ x23 \\ x24 \\ x34 \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$-x01 + x12 + x13 + x14 = 0$$

$$-x02 - x12 + x23 + x24 = 0$$

$$-x03 - x13 - x23 + x34 = 0$$

$$\begin{pmatrix} x01 \\ x02 \\ x03 \\ x12 \\ x13 \\ x14 \\ x23 \\ x24 \\ x34 \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \\ 4 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x01 \\ x02 \\ x03 \\ x12 \\ x13 \\ x14 \\ x23 \\ x24 \\ x34 \end{pmatrix} = \text{maximize}(Cf1, x01, x02, x03, x12, x13, x14, x23, x24, x34)$$

$$\begin{pmatrix} x01 \\ x02 \\ x03 \\ x12 \\ x13 \\ x14 \\ x23 \\ x24 \\ x34 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$Cf1(x01, x02, x03, x12, x13, x14, x23, x24, x34) = 6$$

$$Cf2(x01, x02, x03, x12, x13, x14, x23, x24, x34) = 6$$

$$\text{MaxFeel} = \min(Cf1(x01, x02, x03, x12, x13, x14, x23, x24, x34), Cf2(x01, x02, x03, x12, x13, x14, x23, x24, x34))$$

$$\text{MaxFeel} = 6$$

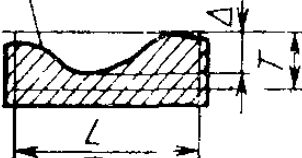


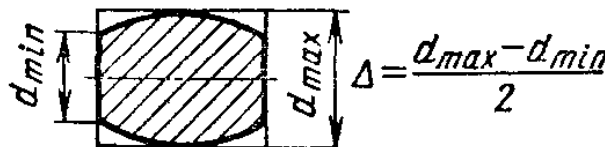
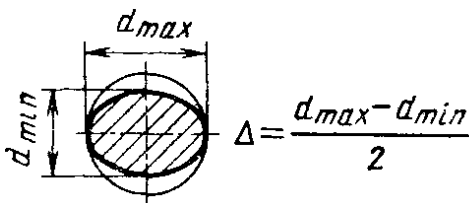
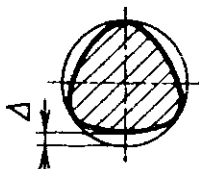
**Приложение 6**  
**Точность размеров**

Допуск	Зависимость $a \cdot i$	Методы обработки
IT 6	10i	Тонкое (алмазное) обтачивание, чистовое шлифование
IT 7	16i	Чистовое обтачивание, чистовое шлифование, холодная штамповка
IT 8	25i	Чистовое обтачивание, шлифование, тонкое фрезерование
IT 9	40i	Шлифование, фрезерование, обтачивание
IT 10	64i	Шлифование, обтачивание, фрезерование, точное литье под давлением
IT 11	100i	Чистовое фрезерование, литье по выплавляемым моделям, холодная штамповка, точение и обтачивание
IT 12	160i	Черновое обтачивание, черновое фрезерование, литье в оболочковые формы, холодная штамповка в вырубных штампах
IT 13	250i	
IT 14	400i	Черновое обтачивание, фрезерование, литье в песчаные и металлические формы, литье под давлением, горячая ковка в штампах
IT 15	640i	
IT 16	1000i	Грубое обтачивание, автоматическая газовая резка, сварка, литье в песчаные формы, горячая ковка в штампах
IT 17	1600i	
i – множитель, определяемый в зависимости от значения номинального размера		

$$i = \begin{cases} 0,5 \cdot \sqrt[3]{D_c} + 0,001 \cdot D_c & \text{при } 1 \leq D_c \leq 500 \text{ (мм)} \\ 0,004 \cdot D_c + 2,1 & \text{при } 500 < D_c \leq 10000 \text{ (мм)} \end{cases}$$

$$D_c = \sqrt{D_{\min} \cdot D_{\max}}$$

## Приложение 7 Отклонения формы

Эскиз	Определение
<p style="text-align: center;"><i>Реальный профиль</i></p> 	<p>Отклонение от плоскостности <math>\Delta</math> – наибольшее расстояние от точек реальной поверхности (профиля) до прилегающей плоскости (прямой) в пределах нормируемого участка L</p>
	<p>Конусообразность <math>\Delta</math> – отклонение профиля продольного сечения, при котором образующие прямолинейны, но не параллельны</p>
	<p>Бочкообразность <math>\Delta</math> – отклонение профиля продольного сечения, при котором образующие не прямолинейны и диаметры увеличиваются от краев к середине сечения</p>
	<p>Седлообразность <math>\Delta</math> – отклонение профиля продольного сечения, при котором образующие непрямолинейны и диаметры уменьшаются от краев к середине сечения</p>
	<p>Овальность <math>\Delta</math> – отклонение от круглости, при котором реальный профиль представляет собой овалообразную фигуру, наибольший и наименьший диаметры которой находятся во взаимно перпендикулярных направлениях</p>
	<p>Огранка <math>\Delta</math> – отклонение от круглости, при котором реальный профиль представляет собой многогранную фигуру</p>

**Приложение 8**  
**Точность формы**

Поверхность	Степень точности	Метод обработки [102]
Плоскость	3...6	Шлифование повышенной точности
	7...8	Обдирочное шлифование, фрезерование
	9...10	Фрезерование
Цилиндр	1...2	Тонкое шлифование
	3...4	Тонкое шлифование, тонкое обтачивание
	5...6	Шлифование, чистовое обтачивание
	7...8	Чистовое точение
	9...10	Обтачивание



**Приложение 9**  
**Шероховатость поверхности**

Метод обработки [100, 102]		Параметры шероховатости, мкм	
		R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>
Наружные поверхности вращения			
Обтачивание:	черновое	12,5...50	50...200
	получистовое	3,2...12,5	12,5...50
	чистовое	0,8...2,5	3,2...10
	тонкое	0,1...0,8	0,4...3,2
Шлифование:	предварительное	1...2,5	4...10
	чистовое	0,2...1,25	0,8...5
	тонкое	0,05...0,25	0,2...1
Вихревое фрезерование:	черновое	3,2...12,5	12,5...50
	чистовое	0,8...3,2	3,2...12,5
	тонкое	0,2...1	0,8...4
Плоские поверхности			
Торцевое фрезерование:	черновое	3,2...12,5	12,5...50
	чистовое	1...4	4...16
	тонкое	0,32...1,25	1,25...5
Цилиндрическое фрезерование:	черновое	3,2...12,5	12,5...50
	чистовое	0,8...3,2	3,2...12,5
	тонкое	0,2...1	0,8...4
Торцевое точение:	черновое	25...50	100...200
	чистовое	1,6...6,3	6,4...25
	тонкое	0,32...1,6	1,25...6,4
Шлифование:	предварительное	1,6...4	6,4...16
	чистовое	0,32...1,6	1,25...6,4
	тонкое	0,08...0,32	0,32...1,24

**Приложение 10**  
**Волнистость поверхности**

Метод обработки [100, 102]	Волнистость $W_{z, \text{мкм}}$
Поперечная волнистость	
Шлифование: <span style="margin-left: 100px;">круглое</span>	0,5...7,5
<span style="margin-left: 100px;">плоское</span>	0,8...13,0
Торцевое фрезерование	2,5
Точение	1
Продольная волнистость	
Плоское шлифование	1,2...12,0
Цилиндрическое фрезерование	7,5...40,0

**Приложение 11**

**Степень и глубина наклепа поверхностного слоя**

Метод обработки [100, 102]		Степень наклёпа	Глубина наклёпа, мкм
Точение:	обычное и скоростное	120...150	30...50
	тонкое	140...180	20...60
Фрезерование:	торцевое	140...160	40...100
	цилиндрическое	120...140	40...80
Шлифование:	круглое	140...200	30...60
	плоское	150	16...35

Научное издание

Юлий Львович Чигиринский  
**Математические методы управления процессами  
механической обработки**

Монография

Редактор А. К. Саютина  
Темплан 2010 г. Поз. № 20н

Подписано в печать 01.07.2010. Формат 60 x 84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,13. Уч.-изд. л. 7,37. Тираж 200 экз.  
Заказ

Волгоградский государственный технический университет.  
400131, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 1

ИУНЛ ВолгГТУ.  
400131, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 7