



**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»**

**М. И. Михайлов**

# **ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2017**

УДК 001.89:621:002(075.8)  
ББК 34.5я73  
М69

Рецензенты: зав. каф. «Материаловедение и технологии материалов» Белорусского государственного университета транспорта  
д-р техн. наук, проф. *П. Н. Богданович*;  
проф. каф. «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета д-р техн. наук, проф. *И. А. Капительян*

**Михайлов, М. И.**  
М69 Основы научных исследований и инновационной деятельности : учеб. пособие / М. И. Михайлов ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 399 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-354-7.

Приведены методики исследований технологического оборудования и обработки их результатов. Даны основные принципы планирования экспериментов и обработки результатов. Раскрыты методы поиска новых инновационных решений в области металлообработки.  
Для студентов машиностроительных специальностей вузов.

УДК 001.89:621:002(075.8)  
ББК 34.5я73

ISBN 978-985-535-354-7

© Михайлов М. И., 2017  
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2017

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	9
1. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	11
1.1. Сравнение эмпирических выборок.....	12
1.1.1. Выборки большого объема.....	12
1.1.2. Выборки небольшого объема.....	12
1.2. Выравнивание результатов эксперимента по законам распределения.....	15
1.2.1. Закон редких событий (Пуассона).....	15
1.2.2. Закон Вейбулла.....	16
1.2.3. Закон Гаусса.....	17
1.2.4. Закон равной вероятности.....	19
1.3. Анализ ошибок измерений.....	21
1.3.1. Методы оценки случайных ошибок измерений.....	23
1.3.2. Методы оценки систематических ошибок измерений.....	27
1.4. Математическая обработка результатов эксперимента.....	30
1.4.1. Обработка результатов прямых измерений.....	30
1.4.2. Обработка результатов косвенных измерений.....	33
1.5. Определение необходимого количества измерений.....	35
2. ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	37
2.1. Моделирование с использованием безразмерных критериев.....	37
2.2. Моделирование с использованием аналогий.....	39
2.2.1. Электрическая подсистема.....	39
2.2.2. Механические поступательная и вращательная подсистемы.....	40
2.2.3. Гидравлическая и пневматическая подсистемы.....	44
2.2.4. Тепловая подсистема.....	47
2.2.5. Формальное представление структуры объекта на макроуровне.....	49
2.2.6. Разнородные физические подсистемы.....	54
3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	57
3.1. Основы регрессионного анализа.....	59
3.2. Оценка параметров регрессионной модели.....	62
3.3. Планы экспериментов и их свойства.....	66
3.3.1. План линейного вида.....	70
3.3.2. План полных факторных экспериментов.....	73
3.3.3. План дробных факторных экспериментов.....	81

3.4. Статистический анализ результатов активного эксперимента .....	85
3.4.1. Эксперименты с параллельными опытами .....	85
3.4.2. Отсевание грубых ошибок .....	86
3.4.3. Проверка однородности дисперсий .....	87
3.4.4. Дисперсия воспроизводимости эксперимента .....	88
3.5. Определение коэффициентов регрессионной модели и проверка их значимости .....	89
3.6. Проверка адекватности и работоспособности регрессионной модели .....	91
3.7. Регрессионный анализ результатов эксперимента на детерминированной теоретической модели .....	101
3.8. Получение математической модели на основе пассивного эксперимента .....	103
3.9. Порядок проведения экспериментов при оптимизации параметров .....	107
3.9.1. Однопараметрическая оптимизация .....	107
3.9.2. Многопараметрическая оптимизация .....	109
3.9.2.1. Метод сеток .....	110
3.9.2.2. Метод наискорейшего спуска (подъема) .....	111
3.9.2.3. Метод прогнозируемого шага .....	112
4. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....	114
4.1. Методика исследования контактных площадей опорных поверхностей .....	114
4.2. Методика исследования контактной жесткости .....	117
4.3. Методика исследования статической точности сборного резца оптическими измерениями .....	119
4.4. Методика исследования точности позиционирования стола станка .....	122
4.5. Методика исследования передачи «винт–гайка» .....	123
4.5.1. Исследование кинематической погрешности .....	123
4.5.2. Исследование статической точности передачи «винт–гайка» скольжения .....	124
4.5.3. Исследование передачи «винт–гайка» качения .....	125
4.5.4. Методика определения КПД передачи «винт–гайка» .....	127
4.5.5. Оценка погрешности экспериментов .....	128
4.6. Методика исследования виброустойчивости оборудования .....	131
4.6.1. Средства измерения параметров динамической системы станков .....	131
4.6.2. Экспериментальные методы исследования виброустойчивости станков .....	139

4.7. Методика исследования внутренних напряжений базовых элементов станков .....	146
4.7.1. Метод деформируемых сеток.....	146
4.7.2. Поляризационно-оптический метод .....	147
4.7.3. Спекл-анализ.....	150
4.7.4. Голографический метод.....	151
4.7.5. Метод хрупких покрытий.....	152
4.7.6. Метод муаровых полос .....	152
4.8. Методы исследования свойств композиционных материалов .....	152
4.9. Методы исследования состава и свойств поверхностных слоев деталей .....	156
<b>5. ИННОВАЦИИ И ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС .....</b>	<b>162</b>
5.1. Сущность и содержание понятия «инновация» .....	162
5.2. Виды технических задач и проблемы при их решении.....	164
5.2.1. Метод преобразования условий задачи .....	168
5.2.2. Анализ противоречий при решении технических задач .....	168
5.3. Алгоритм решения задач с анализом противоречий .....	178
5.4. Структурный анализ технических объектов .....	180
5.4.1. Генетический подход .....	180
5.4.2. Структурный подход.....	181
5.4.3. Метод функционального анализа объектов.....	182
5.4.4. Построение конструктивной функциональной структуры технического объекта.....	187
5.5. Коллективные методы поиска новых решений.....	199
5.5.1. Метод прямой мозговой атаки .....	199
5.5.2. Метод обратной мозговой атаки.....	202
5.5.3. Комбинированные методы мозговой атаки.....	205
5.6. Методы индивидуального поиска новых решений .....	209
5.6.1. Метод синектики .....	209
5.6.2. Методы аналогии.....	210
5.6.3. Символьный метод .....	219
5.6.4. Метод системного анализа .....	221
5.6.5. Фразеологические методы.....	226
5.6.6. Метод превращения незнакомого в знакомое и наоборот .....	232
5.6.7. Морфологический подход к анализу и синтезу объектов.....	237
5.6.8. Метод инверсии .....	246
5.6.9. Метод маленьких человечков .....	248
5.6.10. Использование систем «элемент–поле–элемент».....	249
5.6.11. Анализ ЭПЭ систем.....	268
5.6.12. Физико-технические эффекты .....	272
5.6.13. Математические эффекты .....	273

5.6.14. Использование эффектов изменения расположения .....	292
5.6.15. Задачи на обнаружение и измерение свойств объекта .....	295
5.6.16. Метод отрицания и конструирования .....	297
5.7. Использование законов и закономерностей строения и развития технических систем.....	298
5.7.1. Закон увеличения степени идеальности технических объектов.....	299
5.7.2. Закономерность стадийного развития.....	302
5.7.3. Закономерность свертывания–развертывания технической системы .....	305
5.7.4. Закономерность взаимосвязанного и неравномерного развития .....	308
5.7.5. Закономерность спирального развития техники.....	308
5.7.6. Принцип соответствия функции и структуры.....	309
5.7.7. Принцип энергетической проводимости .....	314
5.7.8. Принцип согласования–рассогласования .....	316
5.7.9. Принцип симметрии.....	319
5.8. Решение исследовательских задач .....	323
5.8.1. Выявление и прогнозирование нежелательных эффектов и явлений в конструкциях и технологиях.....	325
5.8.2. Особенности задач синтеза .....	327
5.9. Цели и методы инновационной деятельности .....	332
5.9.1. Законодательство Республики Беларусь в области инноваций.....	334
5.9.2. Критерии инноваций .....	337
5.9.3. Организация инновационной деятельности .....	337
5.9.4. Этапы инновационной деятельности на предприятии .....	340
5.9.5. Оценка эффективности инноваций.....	343
5.9.6. Инвестирование инновационной деятельности .....	345
Литература .....	355
Приложения .....	358

## Условные обозначения

**АФЧХ** – амплитудофазочастотная характеристика

**БП** – блок питания

**ВПИ** – вектор психологической инерции

**ВЭ** – вычислительный эксперимент

**ГПФ** – главная полезная функция

**ГУ** – гидроусилитель

**ДС** – динамическая система

**ДФЭ** – дробный факторный эксперимент

**ИКР** – идеальный конечный результат

**ИТР** – идеальный текущий результат

**ИД** – исходные данные

**ИП** – измерительный преобразователь

**ИС** – интеллектуальная собственность

**КПП** – конструкторская подготовка производства

**КТР** – конструкторско-технологические решения

**КФС** – конструктивная функциональная схема

**МАО** – магнитно-абразивная обработка

**МА** – мозговая атака

**ММ** – математическая модель

**МНК** – метод наименьших квадратов

**МОК** – метод отрицания и конструирования

**МПиО** – метод проб и ошибок

**МТ** – морфологическая таблица

**МЯ** – морфологический ящик

**НС** – нормативная система

**НЭ** – нежелательный эффект

**ОВ** – оперативное время

**ОЗ** – оперативная зона

**ОПП** – организационная подготовка производства

**ОП** – операционное противоречие

**ОС** – окружающая среда

**ОУ** – орган управления

**ОФ** – основная функция

**ОЦ** – обрабатывающий центр

**ОЭС** – оже-электронная спектроскопия

**ПАВ** – поверхностно-активные вещества

**ПП** – предметное противоречие

**ПС** – проблемная ситуация  
**ПФС** – потоковая функциональная система (схема)  
**ПЭ** – передаточные элементы  
**ПФЭ** – полный факторный эксперимент  
**РМ** – регрессионная модель  
**РО** – рабочий орган  
**РП** – регистрирующий измерительный прибор  
**РР** – режим резания  
**РФЭС** – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия  
**СОЖ** – смазочно-охлаждающая жидкость  
**ТДВ** – твердые дисперсные вещества  
**ТО** – технический объект  
**ТП** – техническое противоречие  
**ТПП** – технологическая подготовка производства  
**ТР** – техническое решение  
**ТРИЗ** – теория решения изобретательских задач  
**Тр** – трансмиссия  
**ТС** – техническая система  
**ТФ** – техническая функция  
**ТЭО** – технико-экономическое обоснование  
**У** – усилитель  
**УЗК** – ультразвуковое колебание  
**УФЭС** – ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия  
**УС** – упругая система  
**УЭ** – упругий элемент  
**ФМ** – физическая модель  
**ФО** – физическая операция  
**ФП** – физическое противоречие  
**ФПД** – физический принцип действия  
**ФС** – функциональная структура  
**ФТЭ** – физико-технический эффект  
**ФЭ** – физический эксперимент  
**ЧДС** – чистая дисконтированная стоимость  
**ШД** – шаговый двигатель  
**ЭПЭ** – элемент–поле–элемент  
**ЭСХА** – электронная спектроскопия для химического анализа  
**ЭФМ** – эквивалентная физическая модель



## ВВЕДЕНИЕ

Роль конструктора в развитии современного материального мира трудно переоценить. В машиностроении 80...85 % затрат предопределяется техническими решениями, которые формируются в процессе конструирования и разработки технологий. Повышение эффективности конструирования является одной из основных задач современного машиностроения.

Конструктор всегда должен считать реальным то, что существует в воображаемом будущем. Конструирование всегда оригинально независимо от того, как решается задача – интуитивно или на основе аналогов.

В процессе работы конструктор должен соблюдать последовательность этапов проектирования и использовать определенные методы научно-технического творчества, приемы и знания в различных областях науки и техники, и в этом случае можно каждый раз получать наиболее удачные решения. Кроме того, получение качественно новых результатов обычно базируется на некотором скачке: переходе от традиционного к необычному. Поэтому конструирование – это не наука и не искусство, но содержит элементы того и другого. Успех дела зависит от их правильного сочетания. В этом смысле инженерное творчество ближе к изобретательству, чем к научному исследованию. Роль озарения, находки, интуиции здесь чрезвычайно велика. Поэтому далеко не все конструкторы, обладающие глубокими знаниями, становятся талантливыми.

*Конструирование* представляет собой одну из эмпирикоинтуитивных форм творческой деятельности, плохо поддающихся изучению, формализации и алгоритмизации. Конкретные методы конструирования всегда индивидуальны, поэтому очень трудно формулировать однозначные рецепты по их применению.

Эдисон говорил, что «общество никогда не бывает готово к тому, чтобы принять какое-то изобретение», поэтому нужно проявлять выдержку, чтобы идеи были поняты и приняты.

Основная трудность творческого процесса конструирования – это восприятие всей проблемы сразу. Нужно видеть будущие трудности при том или другом варианте как конструктивного плана, так и технологического (возможности изготовления, сборки, условия ремонта и др.). Безусловно, увидеть проблему «целиком» до мелочей

не дано никому, но выделить главные звенья уже на ранней стадии хорошему конструктору, как правило, удастся.

Создание разнообразных современных образцов высокоэффективной техники связано с необходимостью поиска новых, не имеющих аналогов, оригинальных (на уровне изобретений), а в ряде случаев и пионерских технических решений. Они обеспечивают разработку сложных технических систем различного служебного назначения. Процесс проектирования различных объектов позволяет выявить следующие наиболее важные элементы: необходимость придерживаться некоторой выработанной методологии; использование системного и функционального анализа; умение в сжатые сроки выявлять и применять релевантную информацию; адаптивный подход к различным этапам проектирования и др.

Термин «методология» обычно воспринимается применительно к научному познанию, т. е. как форме и способу научно-познавательной деятельности.

Родоначальником методологии является английский философ Ф. Бэкон (1561–1626), впервые выдвинувший идею – вооружить науку системой методов. Его последователи: французский мыслитель Р. Декарт, английские философы Дж. Локк, Д. Юм, немецкие философы И. Кант, И. Фихте, Г. Гегель – сформировали философскую методологию познания.

Современная методология располагает мощным арсеналом весьма разнородных средств, предназначенных для решения задач самого разного характера. В свою очередь это породило новую методологическую ситуацию: современный инженер нередко оказывается перед необходимостью выбора наиболее эффективного методологического средства из некоторого их набора и необходимостью тесного соединения элементов науки и практики, в особенности при решении крупных комплексных задач.

В представленном пособии раскрыты вопросы получения и обработки результатов эксперимента. Приведены частные методики исследований оборудования машиностроительного производства, а также раскрыты способы поиска новых технических инновационных решений.

# 1. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений следует записывать в порядке их получения в виде отклонений от номинального значения размера или в виде фактических результатов измерений. Найденный диапазон рассеивания делят на интервалы, число которых рекомендуется выбирать в пределах от 6 до 14. Как слишком малое, так и слишком большое число искажает внешний вид кривой рассеивания размеров.

Каждое последующее число получается из предыдущего добавлением численного значения интервала. Для графического изображения эмпирических распределений строятся гистограммы и полигоны распределений (рис. 1.1).

Полигоны распределений и гистограммы могут быть построены как по частотам, так и по частостям. Строить полигоны предпочтительнее по частостям [1].

Для построения полигона распределения (рис. 1.1, б) по оси абсцисс откладываются значения случайной величины, а по оси ординат величины, пропорциональные частотам. Сумма ординат должна быть равна единице.

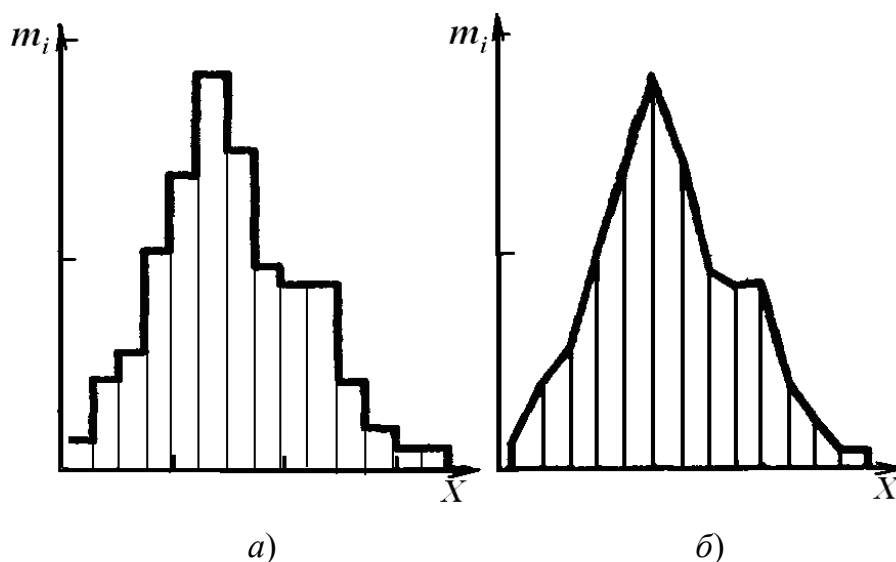


Рис. 1.1. Эмпирические законы распределений:  
а – гистограмма; б – полигон

Для построения гистограммы (рис. 1.1, а) по оси абсцисс откладываются в выбранном масштабе интервалы. По оси ординат пропорционально частотам (частостям) откладываются высоты прямоугольников.

Если производилось измерение нескольких однотипных параметров, то необходимо определить принадлежность полученных результатов к одной совокупности.

## 1.1. Сравнение эмпирических выборок

### 1.1.1. Выборки большого объема

Пусть имеем две выборки объемов  $N_1$  и  $N_2$  с известной функцией распределения исследуемых параметров. Объем каждой выборки  $N_i > 100$ . Необходимо определить, являются ли они выборками из одной генеральной совокупности.

Для решения этой задачи диапазон значений обеих выборок разбивается на одинаковые интервалы и подсчитывается число частот в каждом интервале. Для первой выборки эти частоты будем обозначать  $m'_i$ , для второй  $m''_i$ .

Для сравнения  $m'_i$  и  $m''_i$  воспользуемся критерием  $\chi^2$ , который вычисляется по формуле  $\chi^2 = N_1 N_2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{m'_i + m''_i} \left( \frac{m'_i}{N_1} - \frac{m''_i}{N_2} \right)^2$ .

По рассчитанным значениям  $\chi^2$  и  $k = n - 1$  находим  $P(\chi^2)$  [1]. Если  $P(\chi^2) > 0,05$  (или 0,01), то выборки принадлежат одной совокупности и их можно объединить.

В том случае, когда объемы выборок одинаковы, т. е.  $N_1 = N_2 = N$ , критерий  $\chi^2$  имеет более простой вид:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(m'_i - m''_i)^2}{m'_i + m''_i},$$

где  $n$  – число интервалов.

### 1.1.2. Выборки небольшого объема

Если  $N_1 \geq 10$  и  $N_2 \geq 10$ , то можно пользоваться формулой нормального распределения.

Положим,  $N = N_1 + N_2$ . Тогда  $p(m \leq d_0) = 0,5 - \Phi \left( \frac{2N_1 N_2 - d_0}{2\sqrt{N} \frac{N_1 N_2}{N^2}} \right)$ .

Приняв

$$t = \left( \frac{2N_1N_2 - d_0}{2\sqrt{N} \frac{N_1N_2}{N^2}} \right),$$

значение  $\Phi(t)$  находим по таблицам [1]. Здесь  $d_0$  – число серий, полученных в данном эксперименте.

**Пример 1.** Получены следующие две выборки:

$X - 0,76; 0,78; 0,81; 0,77; 0,80; 0,76; 0,80; 0,75; 0,78; 0,75; 0,77; 0,74.$

$Y - 0,80; 0,77; 0,79; 0,78; 0,81; 0,77; 0,80; 0,80; 0,77; 0,81; 0,81.$

$N_1 = 12; N_2 = 11; N = 23.$

Расположим все значения в возрастающем порядке и подсчитаем число серий:

0,74	0,75	0,75	0,76	0,76	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
+	+	+	+	+	+	+			-
1							2		

0,78	0,78
+	+
3	

0,78	0,79	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81
	-		+	+		-	-	-		+
4		5		6			7	8		

Число серий  $d_0 = 8.$

$$t = \frac{2 \frac{132}{23} - 8}{2\sqrt{23} \cdot \frac{132}{23^2}} = 1,5; \quad \Phi(t) = 0,43.$$

$$P(m \leq d_0) = 0,5 - 0,43 = 0,07 > 0,05.$$

Следовательно, при уровне значимости 0,05 обе выборки можно считать принадлежащими к одной генеральной совокупности.

Очень часто на практике встает вопрос о том, следует ли отвергать некоторые результаты эксперимента, резко отличающиеся от остальных.

Ирвин предложил критерий, при применении которого расчеты  $\bar{x}$  и  $s$  проводят по всем данным эксперимента, а затем определяется случайность выделяющегося значения. Критерий основан на разности  $x_N$  и  $x_{N+1}$  результатов измерений, где  $x_N$  и  $x_{N+1}$  – два наибольших значения случайной величины. Функция

$$\lambda = \frac{x_{N+1} - x_N}{S}$$

табулирована Ирвином (табл. 1.1) для уравнений значимости 0,95; 0,99.

Если полученное значение  $\lambda$  больше значения, соответствующего табличному при  $N$  с заданной вероятностью 0,95; 0,99, то исследуемое наблюдение следует отбросить, если менее, то его следует оставить.

**Пример 2.** Пусть имеем результаты наблюдений, расположенные в возрастающем порядке: 3, 4, 5, 6, 7, 7, 8, 9, 9, 10, 11, 17.

Определяем  $\bar{x}$  и  $S$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} = 8,0; \quad S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} = 3,71.$$

В примере  $x_{N+1} = 17$ ;  $x_N = 11$ .

Определяем:

$$\lambda = \frac{x_{N+1} - x_N}{S} = \frac{17 - 11}{3,71} = 1,6.$$

Таблица 1.1

**Справочные данные**

$N$	$\lambda_{0,95}$	$\lambda_{0,99}$
2	2,8	3,7
3	2,2	2,9
10	1,5	2,0
20	1,3	1,8
30	1,2	1,7
50	1,1	1,6
100	1,0	1,5
400	0,9	1,3
1000	0,8	1,2

По табл. 1.1 находим, что для ближайшего  $N = 10$ ;  $\lambda_{0,95} = 1,5$ :

$$(\lambda_{0,95} = 1,5) < (\lambda = 1,6).$$

Поэтому значение  $x_{N+1} = 17$  необходимо отбросить и считать результатом грубой ошибки.

Если требуется провести дальнейшие расчеты по данной выборке, то необходимо пересчитать  $\bar{x}$ ,  $S$  без  $x_i = 17$ .

## 1.2. Выравнивание результатов эксперимента по законам распределения

### 1.2.1. Закон редких событий (Пуассона)

Вероятность встречаемости события  $m_i$  раз при  $N$  опытах определяется по формуле

$$P(m_i) = \frac{m^{-m_i} e^{-m}}{m_i!}.$$

От величин  $x_i$  (середины интервалов) переходим к новой величине:

$$x'_i = \frac{x_i - x_1}{h}.$$

Находим:

$$\bar{x}' = \frac{\sum m_i x'_i}{N}.$$

Полагая  $a = \bar{x}'$ , по [1] находим  $p(x'_i)$  и, умножая на  $N$ , получаем  $m'_i$ . Кривые закона Пуассона показаны на рис. 1.2.

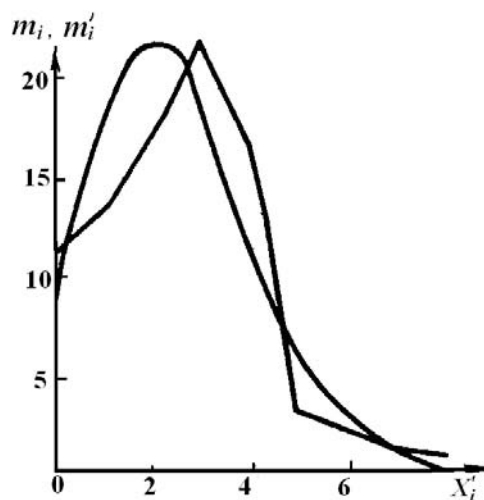


Рис. 1.2. Эмпирическая и теоретическая кривые закона Пуассона

### 1.2.2. Закон Вейбулла

Функция плотности вероятности закона Вейбулла имеет вид:

$$\varphi(x) = b\lambda x^{b-1} \cdot \exp(-\lambda x^b),$$

где  $b, \lambda$  – параметры распределения, или

$$\varphi(x) = \left(\frac{k_b}{\bar{x}}\right)^b b x^{b-1} \cdot \exp\left(-\frac{k_b x}{\bar{x}}\right)^b.$$

По опытным данным вычисляем  $\bar{x}$  и  $s$  по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \quad s = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2}.$$

Определяем коэффициент вариации  $v_x$ :

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}}.$$

По [1] для вычисленного  $v_x$  находим значения  $b$  и  $k_b$ .

Вычисляем параметр:

$$a = \frac{\bar{x}}{k_b}.$$

Для найденных величин  $b$  и  $a$  по [1] находим значение  $af(x)$  для каждого из значений  $\frac{x}{a}$ .

Найденные значения  $af(x)$  делим на параметр  $a$ .

Выводим значения частот находим из выражения

$$m'_i = \sum m_i \cdot h \cdot \varphi(x).$$

Так как закон Вейбулла двухпараметрический, то  $k = n - 2$ . Для  $\chi^2$  и  $k = 3$  находим [1], что  $P(\chi^2) > 0,05$ .

Это указывает на хорошее согласие опытного распределения с законом Вейбулла.

График функции приведен на рис. 1.3.





Рис. 1.3. Эмпирическая и выровненная кривые закона Вейбулла

### 1.2.3. Закон Гаусса

Для построения кривой нормального распределения подсчитываются теоретические частоты нормального распределения функции  $\Phi(t)$ .

Значение  $t$  вычисляют по формуле

$$t = \frac{X_{\text{Нб}} - \bar{X}}{S},$$

где  $X_{\text{Нб}}$  – наибольшее или верхнее значение данного интервала.

Затем определяют значения функции Лапласа [1], по которым для каждого интервала подсчитывается интегральная функция.

$$F(x) = 0,5 + \Phi(t).$$

По  $F(x)$  можно определить теоретическую частоту.

Для первого интервала:

$$m'_1 = F(x)N;$$

для второго интервала:

$$m'_2 = [F(x_2) - F(x_1)]N \text{ и т. д.}$$

Полученные теоретические частоты округляются до целых чисел. Затем по округленным значениям теоретических частот строится кривая нормального распределения (рис. 1.4). Построение теоретической кривой следует выполнять в том же графике, где ранее построена кривая эмпирического распределения. Это дает возможность судить о степени совпадения эмпирического распределения с теоретическим.

Для количественного сопоставления эмпирического и теоретического распределения пользуются критериями согласия, например, критерием  $\chi^2$  Пирсона, который вычисляется по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{|m_i - m'_i|^2}{m'_i},$$

где  $n$  – число сравниваемых частот;  $m_i$  и  $m'_i$  – эмпирическая и теоретическая частоты в  $i$ -м интервале.

Если частоты в отдельных интервалах менее пяти, то они объединяются с соседними интервалами.

Затем вычисляется число степеней свободы  $k = n - r - 1$ , где  $r$  – число параметров теоретического распределения (для закона нормального распределения  $r = 2$ ).

Область допустимых значений критерия  $\chi^2$  или область принятия гипотезы характеризуется неравенством

$$\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2(\alpha, k),$$

где  $\chi_{\text{набл}}^2$  – значение критерия, вычисленное по данным наблюдений;  $\chi_{\text{кр}}^2(\alpha, k)$  – критические значения критерия при заданных  $\alpha$  и  $k$ ;  $\alpha$  – уровень значимости (в технике обычно принимается  $\alpha = 0,05$ ).

По [1] находим  $\chi_{\text{кр}}^2$  и сравниваем с  $\chi_{\text{набл}}^2$ . Если неравенство  $\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2$  имеет место, то гипотеза о нормальном законе подтверждается.

Пользуясь критерием Романовского:

$$A = \frac{|\chi^2 - k|}{\sqrt{2k}}.$$

Если  $A < 3$  – гипотеза принимается.

Если  $A \geq 3$  – гипотеза отвергается.

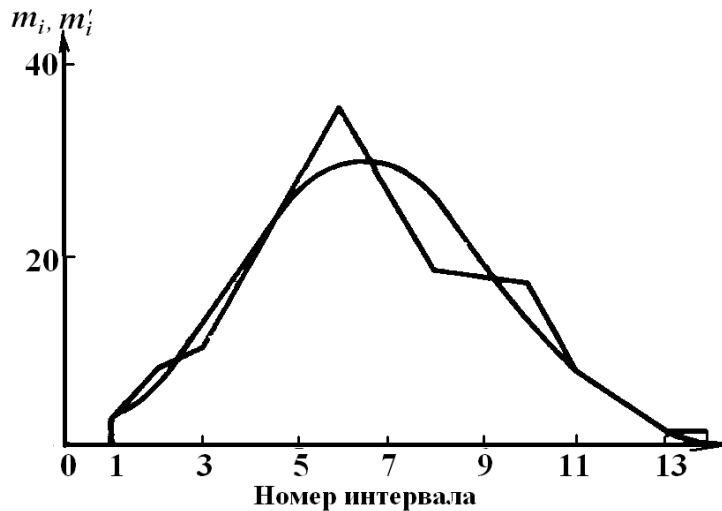


Рис. 1.4. Эмпирическая и выровненная кривые закона Гаусса

### 1.2.4. Закон равной вероятности

Сопоставление эмпирического распределения с теоретическим по закону равной вероятности осуществляется в следующей последовательности.

Плотность вероятности выражается формулой

$$\varphi(x) = \frac{1}{b-a},$$

и этот закон двухпараметрический. Параметрами являются величины  $a$  и  $b$ .

Для определения параметров  $a$  и  $b$  необходимо по опытным данным найти  $\bar{X}$  и  $S^2$ :

$$\bar{X} = \frac{a+b}{2}; \quad S^2 = \frac{(b-a)^2}{12}.$$

Решая эти уравнения, получим:

$$b = \bar{X} + S\sqrt{3} = \bar{X} + 1,73S;$$

$$a = \bar{X} - S\sqrt{3} = \bar{X} - 1,73S.$$

Для упрощения вычислений переходят от величины  $X_i$  (середина интервалов) к новой случайной величине  $X'_i$ :

$$X'_i = \frac{X_i - X_0}{h},$$

где  $X_0$  – значение  $X_i$  равноудаленное от  $X_{i\min}$  и  $X_{i\max}$ .

Вычисляется среднее значение и среднеквадратическое отклонение  $\overline{X'}$ :

$$\overline{X'} = \frac{\sum m_i X'_i}{\sum m_i}; \quad S'^2 = \frac{\sum m_i (X'_i)^2}{\sum m_i} - (\overline{X'})^2; \quad S' = \sqrt{S'^2}.$$

Определяем величины  $a'$  и  $b'$ :

$$a' = \overline{X'} - 1,73S';$$

$$b' = \overline{X'} + 1,73S'.$$

Переходим от случайной величины  $X'$  к  $X$ :  $X_i = X'_i h + X_0$ ;

$$b = b' h + X_0;$$

$$a = a' h + X_0.$$

Находим вероятности интервалов.

Для средних интервалов:

$$\varphi(X_i) = \frac{h}{b-a}.$$

Определяем ширину первого интервала:

$$h_{\text{ш1}} = X_{\text{Нб1}} - a,$$

где  $X_{\text{Нб1}}$  – наибольшее значение данного интервала.

Далее определяем значение:

$$\varphi(X_1) = \frac{h_{\text{ш1}}}{b-a}.$$

Ширина последнего интервала равна:

$$h_{\text{шn}} = b - X_{\text{Нбn}},$$

где  $n$  – количество интервалов;  $X_{\text{Нбn}}$  – наибольшее значение последнего интервала.

Отсюда:

$$\varphi(X_n) = \frac{h_{\text{шn}}}{b-a}.$$

Находим значения частот выравненной кривой:

$$m'_i = N \cdot \varphi(X_i).$$

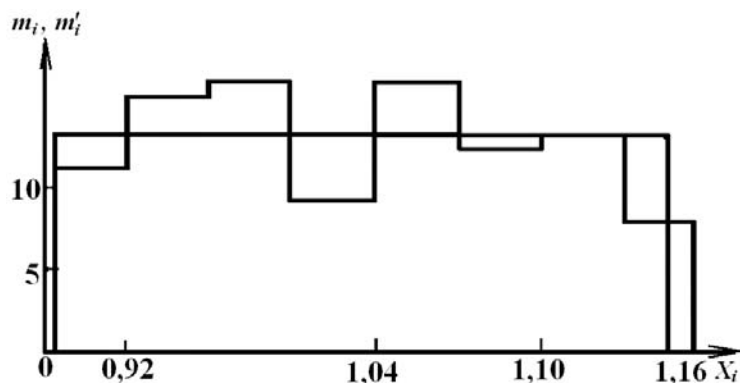


Рис. 1.5. Эмпирическая и теоретическая кривые закона равной вероятности

На рис. 1.5 приведен пример построения гистограммы эмпирического распределения и выровненного теоретического по закону равной вероятности.

### 1.3. Анализ ошибок измерений

На результат измерения могут оказывать влияние различные факторы. Появляются ошибки, которые накладываются на измеренное значение величины так, что оно представляет собой сумму истинного значения измеряемой величины и ошибок. Поэтому определим ошибку  $\Delta x$  как разность между результатом измерения  $x$  и истинным значением измеряемой величины  $\mu$ :

$$\Delta x = x - \mu.$$

Такая ошибка называется абсолютной. Ее значение мало говорит о действительной точности измерения, если не сопоставить значения ошибки и самой измеряемой величины. Относительная ошибка обычно выражается в процентах:

$$\varepsilon = \Delta x_{\text{отн}} = \frac{\Delta x}{x} 100.$$

Действительно, если какая-либо длина измеряется с точностью до 1 см, то в случае когда определяется длина карандаша, это будет очень низкая точность (около 10 %), если же находится расстояние от Минска до Гомеля, – чрезмерно высокая точность ( $1,6 \cdot 10^{-3}$  %). В последнем случае нет необходимости в такой точности измерения.

Ошибки измерения принято подразделять на систематические, случайные и грубые (промахи).

*Систематическая ошибка  $\nu$*  – та, которая остается постоянной на протяжении одной серии измерений или изменяется по какому-либо закону. Такая ошибка возможна при взвешивании на чашечных весах с помощью неточных гирь. Если масса гири отличается от эталона, например на 0,1 г, то масса тела будет, соответственно, завышена или занижена. Чтобы получить верное значение массы тела, необходимо учесть эту ошибку, прибавляя к полученному результату или вычитая из него 0,1 г.

*Случайная ошибка  $\psi$*  изменяется от одного измерения к другому самым различным образом и в равной степени может быть как положительной, так и отрицательной. Случайная ошибка возникает в результате совместного влияния различных случайных факторов. Для оценки случайных ошибок используется аппарат теории вероятностей и математической статистики. С увеличением числа измерений случайная ошибка эксперимента уменьшается.

*Грубая ошибка* (промахи) обусловлена часто недостаточным вниманием экспериментатора. Например, результат взвешивания может быть записан как 1020,0 г вместо 1000,20 г. При измерении длины линейкой промах может появиться в результате того, что один из концов измеряемого предмета окажется не совмещенным с нулем линейки, и т. п.

Систематические ошибки в свою очередь классифицируются по их источникам и свойствам.

Источниками систематических погрешностей могут быть метод измерения, средства измерений и экспериментатор. Соответственно, принято различать систематические погрешности методические, инструментальные и личные.

По свойствам систематические погрешности делят на постоянные и закономерно изменяющиеся. Последние, в свою очередь, подразделяются на прогрессирующие, периодические и изменяющиеся по сложному закону.

Пример постоянных погрешностей приводился выше. Прогрессирующие погрешности – это погрешности, монотонно возрастающие или убывающие в процессе измерений. Такие погрешности вызывает, например, изменение рабочего тока потенциометра из-за падения напряжения на клеммах питающего его аккумулятора. Периодические погрешности – погрешности, изменяющиеся с определенным периодом.

В тех случаях, когда измеряются какие-либо свойства готовой продукции (диаметр детали, состав и свойства материала и т. п.), задача измерений обычно состоит не в получении точного значения

измеряемой величины, а в необходимости установить, укладывается ли значение величины, по которой оценивается это свойство, в определенное поле допуска, установленное для данной продукции. Если это не достигается, изделия являются браком.

Но следствием ошибок измерений могут быть два обстоятельства: 1) хорошее изделие бракуется (такая ошибка называется ошибкой первого рода); 2) брак пропускается (ошибка второго рода).

Казалось бы, что наиболее опасна ошибка второго рода – пропуск брака. Это действительно так, когда мы имеем дело с очень ответственными изделиями (например, в авиа- или автомобилестроении). Чем вернее хотим мы застраховать себя от ошибок второго рода, тем больше (при неизменной точности измерений) делаем ошибок первого рода. Однако для менее ответственных изделий чересчур жесткий контроль, исключающий ошибки второго рода, нецелесообразен. Выбор экономически целесообразной системы измерений и браковки во всех случаях чрезвычайно важен.

### ***1.3.1. Методы оценки случайных ошибок измерений***

В отличие от систематических погрешностей измерений случайные погрешности исключить нельзя, но с помощью методов теории вероятностей и математической статистики можно учесть их влияние при определении истинного значения измеряемой величины.

Случайные погрешности результатов эксперимента можно рассматривать как разновидность случайных величин (событий).

Полностью свойства случайной величины  $X$  описываются функцией распределения  $F(x)$ , которая определяет вероятность того, что случайная величина  $X$  будет меньше  $x$ :

$$F(x) = P\{X < x\}.$$

Наряду с функцией распределения  $F(x)$ , называемой интегральной, применяется и дифференциальная, обычно называемая плотностью распределения:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

В практике точных измерений чаще всего имеет место нормальное, или равномерное распределение случайных величин.

Функции распределения являются полными характеристиками случайных величин, но они не всегда удобны для практического

использования. Поэтому при описании случайных величин применяются и их числовые характеристики – моменты случайных величин: начальные и центральные.

Начальный  $m_k$  и центральный  $\mu_k$  моменты  $k$ -го порядка определяются по формулам:

$$m_k = M[X^k] = \sum_{i=1}^n x_i^k p_i;$$

$$\mu_k = M[X - M(X)]^k = \sum_{i=1}^n (x_i - M[X])^k p_i.$$

Чаще используется начальный момент первого порядка ( $k = 1$ ) – математическое ожидание случайной величины:

$$m_1 = M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (1.1)$$

В указанных соотношениях  $p_i$  – относительная частота появления дискретной величины  $x_i$  в выборке. Предполагается, что  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$  (т. е. рассматривается полная группа событий).

Из центральных моментов особенно важен момент второго порядка ( $k = 2$ ) – дисперсия случайной величины:

$$\mu_2 = D[X] = M[(X - m_1)^2] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2 p_i. \quad (1.2)$$

Положительный корень квадратный из дисперсии носит название среднего квадратического отклонения случайной величины.

$$\sigma = \sqrt{D[X]}.$$

Значение  $\sigma$ , характеризующее разброс случайных величин относительно их математического ожидания, наиболее часто используется для оценки случайной ошибки измерения.

Формулы (1.1) и (1.2) пригодны для оценки  $M[X]$  и  $D[X]$  генеральной совокупности, т. е. множества всех рассматриваемых единиц.

**Пример 3.** Определить параметры закона равной вероятности (рис. 1.6).

$$\text{Уравнение функции } S = y(b - a) \rightarrow y = \frac{S}{(b - a)} = \frac{1}{b - a}.$$



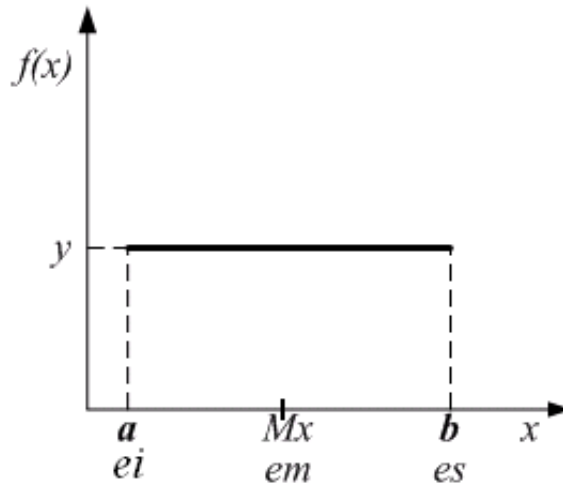


Рис. 1.6. Теоретическая кривая закона равной вероятности

1. Математическое ожидание:

$$\begin{aligned}
 M_x &= \int_a^b x f(x) dx = \int_a^b x \frac{1}{(b-a)} dx = \frac{1}{b-a} \left. \frac{x^2}{2} \right|_a^b = \frac{1}{b-a} \left( \frac{b^2}{2} - \frac{a^2}{2} \right) = \\
 &= \frac{1}{b-a} \frac{(b-a)(b+a)}{2} = \frac{b+a}{2}.
 \end{aligned}$$

2. Дисперсия:

$$\begin{aligned}
 D_x &= \int_a^b x^2 f(x) dx - M_x^2 = \int_a^b x^2 \frac{1}{b-a} dx - \frac{(b+a)^2}{4} = \frac{1}{b-a} \left. \frac{x^3}{3} \right|_a^b - \frac{(b+a)^2}{4} = \\
 &= \frac{1}{b-a} \frac{b^3 - a^3}{3} - \frac{(b+a)^2}{4} = \frac{1}{b-a} \frac{(b-a)(b^2 + ab + a^2)}{3} - \frac{(b+a)^2}{4} = \\
 &= \frac{b^2 + ab + a^2}{3} - \frac{b^2 + 2ab + a^2}{4} = \frac{b^2 - 2ab + a^2}{12} = \frac{(b-a)^2}{12}.
 \end{aligned}$$

3. Среднее квадратическое отклонение:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \sqrt{D_x}; \\
 \sigma_x &= \sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}} = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}.
 \end{aligned}$$

4. Среднее значение:

$$em = \frac{b+a}{2}.$$

5. Коэффициент асимметрии:

$$em = M_x + \alpha \frac{T}{2};$$

$$\alpha = \frac{em - M_x}{\frac{T}{2}} = \frac{(a+b) - (b+a)}{T} = 0.$$

6. Коэффициент относительного рассеивания:

$$6\sigma = kT;$$

$$k = \frac{6\sigma}{T} = \frac{6(b-a)}{T \cdot 2\sqrt{3}} = \frac{6(b-a)}{(b-a) \cdot 2\sqrt{3}} = \frac{3}{\sqrt{3}}.$$

При измерениях обычно имеют дело с конечным подмножеством генеральной совокупности ( $n = 1...30$ ), которое называют выборкой. Выборочные значения  $M[X]$  и  $D[X]$ , обозначаемые обычно  $\bar{x}$  (среднее арифметическое значение) и  $s^2$ , рассчитывают по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (1.3)$$

Если  $n > 30$ , то

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (1.4)$$

где  $n$  – число измерений или объем выборки.

Для оценки случайных ошибок измерений используют иногда коэффициент вариации  $\upsilon$  и среднюю арифметическую ошибку  $r_n$ :

$$\upsilon = \frac{s}{\bar{x}}; \quad r_n = \frac{\sum_{i=1}^n [\bar{x} - x_i]}{n}.$$

При достаточно большом числе наблюдений (практически при  $n > 30$ ) имеют место соотношения:  $s = 1,25r_n$  или  $r_n = 0,8s$ .

По значениям  $s$  и  $\bar{x}$  можно проверить, принадлежат резко выделяющиеся результаты измерений к данной генеральной совокупности или же вызваны грубыми погрешностями и их следует отбросить. Для этого используется критерий Груббса. Определяется величина:

$$\theta = \frac{[x^* - \bar{x}]}{S},$$

где  $x^*$  – наибольшее или наименьшее значение  $x_i$  в выборке. Найденное значение  $\theta$  сравнивается с критическим  $\theta_k$ , приводимым в специальной литературе. Если при количестве измерений и уровне значимости  $\alpha$   $\theta > \theta_k$ , то с вероятностью  $1 - \alpha$  резко выделяющееся значение  $x^*$  можно считать грубой погрешностью и его следует исключить из дальнейшей обработки результатов измерений. После этого значения  $\bar{x}$  и  $s$  следует пересчитать.

При проведении измерений одной из основных является задача учета и исключения систематических ошибок, которые в ряде случаев могут быть так велики, что существенно искажают результаты измерений. Методы учета систематических ошибок зависят от природы и характера последних.

### ***1.3.2. Методы оценки систематических ошибок измерений***

Систематические ошибки по характеру можно разделить на четыре группы [2]:

1. Ошибки, природа которых известна, а величина может быть достаточно точно определена. Они могут быть установлены введением соответствующих поправок. Источники таких ошибок нужно тщательно анализировать, поправки точно определять и учитывать в окончательном результате. Однако здесь требуется разумный подход. Если поправка на порядок (в 10 раз и более) меньше точности измерений, то учитывать ее нет смысла. Величина учитываемых поправок устанавливается в зависимости от величины других ошибок, сопровождающих измерение. Часто принимают, что если поправка не превышает 0,005 от средней квадратичной ошибки  $s$  результата измерений, то ею следует пренебречь. Эта рекомендация чрезмерно жесткая, обычно можно пренебречь поправками, имеющими большее значение.

2. Ошибки известного происхождения, но неизвестной величины. К их числу относится погрешность измерительных приборов, которая определяется иногда классом точности прибора.

Электроизмерительные приборы характеризуются обычно классом точности в пределах 0,05 до 4. Менее точные приборы обозначения класса не имеют.

Если на приборе указан класс точности @, то это значит, что показания прибора правильны с точностью до 0,5 % от диапазона измерений по шкале прибора. Если вольтметр имеет шкалу, градуированную до 150 В, класс точности 0,5, то он дает абсолютную основную погрешность не более  $\pm 0,75$  В.

Максимальные погрешности, даваемые измерительными линейками, микрометрами и некоторыми другими приборами, иногда наносятся на самом приборе или указываются в прилагаемом к нему паспорте. Если таких указаний нет, точность измерений составляет не менее 0,2 цены деления шкалы прибора.

Систематические ошибки данного типа не могут быть исключены. Если при измерении напряжения описанным выше вольтметром получено  $U = 65,3$  В, то можно принять  $U = (65,3 \pm 0,75)$  В. Это означает, что действительное значение напряжения находится в пределах от 64,55 до 66,05 В.

3. Неявные ошибки, о существовании которых можно и не подозревать, хотя они могут быть весьма значительными и потому опасными.

Так, при определении плотности какого-то металла измерением объема и массы образца можно получить грубую ошибку, если образец содержит внутри пустоты, например, пузыри воздуха, образовавшиеся при отливке.

Один из наиболее надежных способов исключения таких погрешностей – проведение измерений той же величины другими методами и в других условиях. Совпадение полученных результатов служит известной, хотя и не абсолютной гарантией их правильности.

4. Ошибки, обусловленные свойствами объекта и не связанные непосредственно с измерительными операциями. Поясним это на примере. Измеряется диаметр цилиндра, который считается круглым, но в действительности имеет форму овала (эллипса). Диаметр, измеренный вдоль большой оси эллипса, будет больше измеренного вдоль его малой оси. Если измерить диаметр один раз и считать цилиндр круглым, то вычисленная по результатам этого измерения площадь сечения цилиндра будет содержать систематическую ошибку, определяемую степенью овальности цилиндра и выбранным для измерения диаметром. Наилучшим образом действительный диаметр цилиндра

будет характеризовать его среднее значение, полученное по результатам ряда измерений в различных плоскостях. При этом систематическая ошибка будет переведена в разряд случайных.

Из множества специальных методов устранения постоянных систематических ошибок рассмотрим метод двойного измерения и метод компенсации.

Метод двойного измерения применяется при проведении экспериментов с помощью устройств, имеющих симметричную структуру (например, весов). Этот метод состоит в том, что проводятся два измерения, при которых роли левой и правой частей установки последовательно меняются.

Метод компенсации предполагает проведение измерений два раза таким образом, чтобы ошибка вошла в результаты один раз с одним знаком, а другой раз – с другим. Этот метод должен применяться, например, при работах с термопарами для исключения паразитных токов.

Простейшим, но частным случаем прогрессирующей погрешности является погрешность, изменяющаяся по линейному закону, например во времени. Для предупреждения такой погрешности можно использовать два наблюдения, выполненных с фиксацией времени.

Если результаты наблюдений  $E_1$  и  $E_2$  удовлетворяют зависимостям:

$$E_1 = x + Kt_1; \quad E_2 = x + Kt_2,$$

где  $x$  – истинное значение измеряемой величины;  $K$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий изменение погрешности измерения во времени;  $t_1$ ,  $t_2$  – моменты времени выполнения наблюдений, то

$$x = \frac{E_1 t_2 - E_2 t_1}{t_2 - t_1}.$$

Существуют и другие методы исключения систематических закономерно изменяющихся погрешностей.

Даже если учтены все систематические ошибки, в результатах измерений все же возможны случайные ошибки, правила вычисления которых будут рассмотрены ниже. Если случайная ошибка принятого метода измерений известна заранее и является определяющей, т. е. существенно больше (в три и более раз) систематической ошибки, измерение следует производить несколько раз. В качестве оценки исследуемой величины принимают обычно среднее арифметическое резуль-

татов ряда измерений. Случайная ошибка этого среднего будет меньше, чем ошибка единичного измерения. Если же определяющей является систематическая ошибка, измерение достаточно выполнить один раз.

## 1.4. Математическая обработка результатов эксперимента

### 1.4.1. Обработка результатов прямых измерений

Рассмотрим наиболее распространенный в практике случай, когда для уменьшения влияния случайных погрешностей производятся равноточные многократные измерения исследуемой величины. Результат каждого наблюдения  $x'_i$  отличается от истинного значения исследуемой величины  $A$  вследствие погрешности, в которой можно выделить случайную  $\psi_i$  и систематическую  $\theta$  составляющие:  $x'_i = A + \psi_i + \theta_i$ . Информация о случайной погрешности получается из повторных наблюдений. О систематической погрешности из самих наблюдений информацию извлечь нельзя. Чтобы оценить эту погрешность, необходимо учесть свойства используемых средств измерений, метод измерения и условия измерения. Математически обоснованное решение задачи нахождения оценки  $A = f(x')$  можно найти, зная вид распределения значений  $x'_i$ . При нормальном распределении погрешностей и результатов наблюдений оптимальной оценкой центра распределения  $A$  является среднее арифметическое результатов наблюдений.

Если систематические погрешности постоянны ( $\theta_i = \theta_0$ ), то вначале определяют среднее арифметическое результатов наблюдений, а затем уточняют его с помощью поправки  $C = -\theta_0$ :

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n x'_i}{n} + C. \quad (1.5)$$

Если систематическая погрешность каждого измерения известна или изменяется закономерно, ее учитывают с помощью поправки и вместо группы результатов наблюдений  $x'_i$  получают группу исправленных результатов  $x_i$ , которые подвергают дальнейшей обработке.

Значение  $\bar{A}$  является точечной оценкой истинного значения  $A$  некоторой величины. Точечные оценки всегда приближительны, поскольку

их получают из отдельной выборки результатов измерений, поэтому необходимо найти доверительный интервал для  $\bar{A}$ , внутри которого с определенной вероятностью  $1 - \alpha$  находится  $A$  ( $\alpha$  – уровень значимости критерия при оценке достоверности различных величин).

Уровень значимости  $\alpha$ , выраженный в процентах, показывает, сколько раз в ста испытаниях мы рискуем ошибиться, объявив изучаемое событие неслучайным. Обычно  $\alpha = 0,01; 0,02; 0,05$ .

Уровню значимости  $\alpha$  соответствует доверительная вероятность  $1 - \alpha = P$ . С вероятностью  $P$  выполняется неравенство  $\bar{\theta} - \varepsilon < \theta < \bar{\theta} + \varepsilon$ , где  $\bar{\theta}$  – точечная оценка неизвестного параметра  $\theta$ ;  $\varepsilon$  – характеризует точность оценки.

Если  $1 - \alpha$  означает вероятность того, что результат измерений  $\bar{A}$  отличается от истинного значения  $A$  не более чем на  $\Delta$ , то

$$P = (\bar{A} - \Delta < A < \bar{A} + \Delta) = 1 - \alpha, \quad (1.6)$$

где 
$$\Delta = t_{\alpha, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}; \quad (1.7)$$

$t_{\alpha, n-1}$  – коэффициент Стьюдента, который зависит от значения  $\alpha$  и  $n - 1$  и приводится в различных работах [1];  $n$  – число измерений.

Оценка (1.6) называется доверительной или интервальной. Зависимость (1.7) записывается также в виде:

$$\Delta = t_{\alpha, n-1} S_{\bar{x}}, \quad (1.8)$$

где 
$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}.$$

Отсюда видно, что  $S_{\bar{x}}$  в  $\sqrt{n}$  раз меньше, чем  $S$   $i$ -го измерения в выборке. Таким образом, если необходимо, например, в два раза уменьшить  $S$  случайной ошибки измерений, нужно выполнять четыре измерения и в качестве оценки измеряемой величины принять среднее арифметическое  $\bar{x}$  результатов этих измерений.

Выше описана схема раздельного учета влияния систематических и случайных ошибок на результат наблюдения (влияние случайной ошибки – в интервальной оценке (1.6), а систематической – в точечной оценке (1.5)). Однако возможно суммирование систематических и случайных ошибок и учет этой суммарной ошибки в интервальной оценке (1.6). Это обусловлено тем, что систематические и случайные ошибки, хотя и имеют разную природу, проявляются совместно. Полная величина случайной ошибки выявляется сразу в результате многократ-

ных наблюдений. При оценке систематической ошибки различными методами определяют вначале предельные значения  $\theta_j$ , ее различных составляющих. В качестве основных составляющих обычно рассматривают систематические ошибки прибора, округления, субъективные, методические. Если принять, что эти погрешности имеют равномерное распределение, то доверительные границы систематической погрешности результата измерения можно найти по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{j=1}^m \theta_j^2}, \quad (1.9)$$

где  $k$  – поправочный коэффициент;  $m$  – число элементарных систематических погрешностей.

Значение  $k$  зависит от доверительной вероятности  $1 - \alpha$  и числа слагаемых  $m$ . При  $1 - \alpha \leq 0,99$   $k$  мало зависит от  $m$ :

$1 - \alpha$	0,90	0,95	0,98	0,99
$k$	0,95	1,1	1,3	1,4.

При малом числе слагаемых, т. е. когда  $m \leq 4$ , может оказаться, что вычисленное по формуле (1.9) значение  $\theta$  превышает арифметическую сумму  $\theta_j$ , что невозможно. В этом случае в качестве  $\theta$  принимают  $\sum_{j=1}^m \theta_j$ .

Если найденные значения  $\theta$  и  $\Delta$  сопоставимы, т. е. не отличаются более чем на порядок, то определяется граница общей погрешности. Для этого часто используют формулу

$$\Delta_{\Sigma} = \theta + t_{\alpha, n-1} S_{\bar{x}}. \quad (1.10)$$

Зависимость (1.10) проста, но дает заведомо завышенную оценку. Более точную оценку  $\Delta_{\Sigma}$  можно найти по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = t_{\Sigma} S_{\Sigma},$$

где  $t_{\Sigma} = \frac{\Delta + \theta}{S_{\bar{x}} + S_v}$ ;  $S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\bar{x}}^2 + S_v^2}$ ;  $S_v = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{j=1}^m \theta_j^2}$ .

Значения  $\Delta$  и  $\theta$  необходимо определить при одном и том же значении  $\alpha$ . Результаты измерений в этом случае запишутся так:  $A = A' + \Delta_{\Sigma}$ , вероятность  $P = 1 - \alpha$ , где значение  $A'$  находится из ряда результатов наблюдений  $x_i$ . Если  $\Delta$  или  $\theta$  несущественно, то вместо  $\Delta_{\Sigma}$  записываем существенную величину.



### 1.4.2. Обработка результатов косвенных измерений

Напомним, что при косвенных измерениях искомое значение исследуемой величины вычисляется по уравнению измерения, в которое входят результаты прямых измерений:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_j, x_m). \quad (1.11)$$

По виду функциональной зависимости (1.11) различают линейные и нелинейные косвенные измерения.

В случае линейных косвенных измерений справедлива зависимость

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_j, \dots, \bar{x}_m). \quad (1.12)$$

При расчете оценки результата косвенных измерений  $y$  можно применить два способа: 1) вычислить значения  $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_j, \dots, \bar{x}_m)$  и, подставив их в уравнение (1.12), получим  $\bar{y}$ ; 2) для каждого из значений  $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nj}$  вычислить  $y_j$ , а затем определить  $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$ , где  $n$  – число прямых измерений. Соответственно, двумя способами вычисляют и погрешность оценки величины  $y$ .

В первом случае дисперсия функции (1.11) случайных независимых аргументов:

$$D(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 D(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 D(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 D(x_m). \quad (1.13)$$

По этой формуле можно найти и среднее квадратическое отклонение случайных и систематических погрешностей измерения  $y$ , подставляя в нее соответствующие значения по результатам прямых измерений. Суммарная погрешность косвенного измерения:

$$S_{y\Sigma} = \sqrt{S_{yv}^2 + S_{y\vartheta}^2}, \quad (1.14)$$

где  $S_{yv}^2$  характеризует случайную составляющую ошибки косвенного измерения, а  $S_{y\vartheta}^2$  – неисключаемую систематическую его составляющую.

Во втором случае вычисляют ряд значений  $y_j$  и по формулам (1.3) или (1.4) находят  $S_y$ .

Если погрешности измерений малы по сравнению с измеряемым значением величины (это условие положено в основу всех формул),

то оба способа дают одинаковые результаты. Однако в силу меньшей трудоемкости вычислений и больших возможностей первый способ предпочтительней (он позволяет определять и  $S_{yv}$ , и  $S_{y\theta}$ ).

Если  $S_{yv}$  и  $S_{y\theta}$  соизмеримы, доверительный интервал для оценки результата косвенного измерения рассчитывается по  $S_{y\Sigma}$  :

$$\Delta = t_{\alpha, n-1} \frac{S_{y\Sigma}}{\sqrt{n}}. \quad (1.15)$$

Если одно из значений  $S_{yv}$  или  $S_{y\theta}$  на порядок больше другого, его и подставляют в формулу (1.15). Окончательные результаты измерения записывают так:  $y = \bar{y} \pm \Delta$ , вероятность  $P = 1 - \alpha$ .

При нелинейных косвенных измерениях формулы (1.12)...(1.14) правомерно использовать лишь в том случае, если функцию (1.11) можно разложить в ряд Тейлора в окрестностях точки  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$  и ограничиться линейным членом разложения. Использование линейного разложения справедливо, когда остаточный член разложения существенно меньше линейного. В случае его соблюдения доверительный интервал для  $\bar{y}$  определяется по формуле (1.13), так как при малом числе измерений он имеет тот же физический смысл, что и  $\sigma$  при большем числе измерений. Значения  $D(x_1), \dots, D(x_m)$  в формуле (1.13) представляют собой дисперсии при измерении величин  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ .

**Пример 4.** Необходимо вычислить доверительный интервал при нелинейных косвенных измерениях.

Предположим, что получена следующая зависимость перемещения  $L$  от времени  $t$  движения руки робота:

$$L = V_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.16)$$

Пусть  $\bar{V}_0 = 12$  мм/с,  $a = 2,5$  мм/с<sup>2</sup>,  $\bar{t} = 30$  с, а доверительные оценки величин  $V_0, a, t$ :  $\Delta_{V_0} = 1$  мм/с,  $\Delta_a = 0,2$  мм/с<sup>2</sup>,  $\Delta_t = 2$  с.

Для оценки погрешности  $\Delta_L$  при определении перемещения  $L$  воспользуемся формулой (1.13) с учетом приближения  $\Delta^2 = D$ .

$$\text{Тогда } \Delta_L = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial V_0} \Delta_{V_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial a} \Delta_a\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial t} \Delta_t\right)^2}. \quad (1.17)$$

Подставив выражение (1.16) в формулу (1.17), получим:

$$\Delta_L = \sqrt{(t\Delta_{V_0})^2 + \left(\frac{t^2}{2}\Delta_a\right)^2 + [(V_0 + at)\Delta_t]^2}. \quad (1.18)$$

Подставив значения величин в формулу (1.18), найдем:

$$\Delta_L = \sqrt{(30 \cdot 1)^2 + \left(\frac{30^2}{2} \cdot 0,2\right)^2 + [(12 + 2,5 \cdot 30)2]^2} = 198 \text{ мм.}$$

Среднее значение пути  $\bar{L} = \frac{12 \cdot 30 + 2,5 \cdot 30^2}{2} = 1485 \text{ мм.}$

Таким образом, окончательный результат –  $L = \bar{L} \pm \Delta_L = (1485 \pm 198) \text{ мм}$ , надежность которого является неизвестной.

### ***1.5. Определение необходимого количества измерений***

Точность измерений при выполнении экспериментального исследования в значительной степени определяет глубину проникновения в природу изучаемого явления.

Часто стараются произвести измерения с наибольшей достижимой точностью. Однако чем точнее это необходимо сделать, тем труднее осуществить. Поэтому не следует проводить измерения с точностью большей, чем необходимо для решения поставленной задачи.

При статистических исследованиях точности и стабильности обработки измерять размеры деталей необходимо с помощью измерительного устройства, погрешность которого составляет не более 0,2 допуска на контролируемый размер детали.

Выбор средств измерений производится в соответствии с ГОСТ 8.401–80 «Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности, средства измерений. Общие требования».

При выборе необходимого числа измерений  $n$  можно исходить из зависимости (1.8), причем случайную ошибку целесообразно уменьшать лишь до тех пор, пока общая погрешность измерений не будет полностью определяться систематической ошибкой.

$$n = \frac{t_{\alpha, n-1}^2 S^2}{\Delta^2}. \quad (1.19)$$

При этом доверительный интервал  $\Delta$  для истинного значения исследуемой величины от случайных ошибок должен быть существенно меньше доверительного интервала  $\theta$  от неучтенных систематических погрешностей, т. е.  $\Delta \ll \theta$ . Это условие можно считать выполненным, когда  $\Delta < 0,1\theta$  или даже  $\Delta < \frac{\theta}{3}$ .

Применение формулы (1.19) затруднено, поскольку нужно заранее знать значение  $S$ , определяемое лишь на основе результатов испытаний. Поэтому пользуются относительными показателями точности измерений. На основании формулы (1.19)  $n$  можно определить в зависимости от  $\varepsilon = \frac{\Delta}{S}$  и доверительной вероятности  $1 - \alpha$ .

Преобразуем формулу (1.19). Пусть  $\Delta = k\bar{x}$ , а  $S = \upsilon\bar{x}$ , где  $k$  – заданный коэффициент, показывающий долю предельной ошибки от среднего арифметического значения величины;  $\bar{x}$  — среднее арифметическое значение исследуемой величины;  $\upsilon$  – коэффициент вариации. Тогда

$$n = \frac{t_{\alpha, n-1}^2 \upsilon^2}{k^2}.$$

По этой формуле можно найти необходимое число наблюдений независимо от размерности того или иного объекта измерений. Значение  $k$  можно определить исходя из практических соображений. В частности, для испытания стойкости режущего инструмента целесообразно принимать среднее значение  $k = 0,2$ . При меньших значениях  $k$  существенно увеличивается объем испытаний.

## 2. ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

### 2.1. Моделирование с использованием безразмерных критериев

*Порядок получения критериев:*

1. Формируется расчетная схема, отражающая реальный объект.
2. На расчетной схеме выделяются параметры, которые необходимо учесть в принятой расчетной модели.
3. Возводятся принятые параметры в произвольные степени, а их произведение приравняется к единице.
4. Переписываются полученные уравнения в размерностях.
5. Упрощаются соотношения.
6. Последовательно показатели степени приравняются при каждой размерности к нулю.
7. Переписывается исходное уравнение с учетом полученных степеней.

**Пример 1.** Необходимо исследовать динамические параметры руки робота.

Формируем расчетную схему (рис. 2.1).

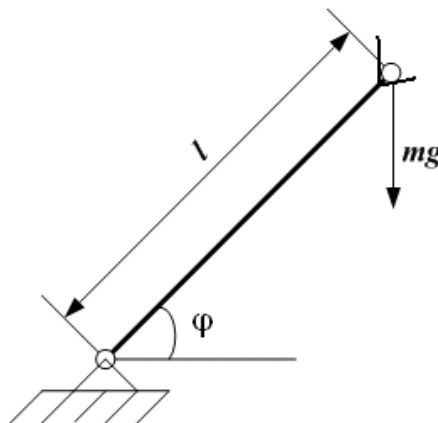


Рис. 2.1. Расчетная схема

1. Выделяем параметры, которые необходимо учесть в принятой расчетной модели:  $l$ ,  $\varphi$ ,  $m$ ,  $g$ ,  $t$ .

Учитывая, что углы можно выразить в радианах, считаем его первым безразмерным критерием:  $\varphi \rightarrow \text{рад}$ .

2. Возводим принятые параметры в произвольные степени, а их произведение приравниваем к единице:

$$l^\alpha m^\gamma g^\beta t^\delta = 1. \quad (2.1)$$

3. Переписываем полученные уравнения в размерностях.

$$[L]^\alpha [M]^\gamma [L]^\beta [T]^{-2\beta} [T]^\delta = 1.$$

4. Упрощаем его:

$$[L]^{\alpha+\beta} [M]^\gamma [T]^{\delta-2\beta} = 1.$$

5. Приравниваем степени при каждой размерности к нулю.

$$\alpha + \beta = 0 \rightarrow \alpha = -\beta; \quad \gamma = 0;$$

$$\delta - 2\beta = 0 \rightarrow \delta = 2\beta.$$

Принимаем  $\beta = 1$ , тогда  $\alpha = -1$ ;  $\delta = 2$ . Подставим полученные значения показателей в уравнение (2.1).

$$6. l^{-1} m^0 g^1 t^2 = 1.$$

Из соотношения получим безразмерные критерии:  $\left. \begin{array}{l} \frac{gt^2}{l} = 1 \\ \Phi \end{array} \right\}$

7. Формируем соотношения для модели и исследуемого объекта:

$$\frac{g_{\text{мод}} t_{\text{мод}}^2}{l_{\text{мод}}} \equiv \frac{g_{\text{н}} t_{\text{н}}^2}{l_{\text{н}}};$$

$$\Phi_{\text{мод}} \equiv \Phi_{\text{н}}.$$

**Пример 2.** Необходимо исследовать внутренние напряжения в станине станка поляризационно-оптическим методом. Для этого исследуемые элементы изготавливаем из оптически активного материала (оргстекла). Выделяем параметры, которые необходимо учесть в принятой модели:  $\sigma$ ,  $E$ ,  $\mu$ ,  $\Phi$ . Выражаем параметры через единицы измерения:

$$1) [\sigma] = \frac{H}{\text{мм}^2} = \frac{[P]}{[L]^2}; \quad 2) [E] = \frac{H}{\text{мм}^2}; \quad 3) \mu; \quad 4) \Phi.$$

Формируем четыре безразмерных критерия:

$$1) \frac{\sigma_{\text{м}} l_{\text{м}}^2}{P_{\text{м}}} \equiv \frac{\sigma_{\text{н}} l_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}}; \quad 2) \frac{E_{\text{м}} l_{\text{м}}^2}{P_{\text{м}}} \equiv \frac{E_{\text{н}} l_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}}; \quad 3) \mu_{\text{м}} \equiv \mu_{\text{н}}; \quad 4) \Phi_{\text{м}} \equiv \Phi_{\text{н}}.$$

Полученные критерии позволяют выбрать материал модели по расчетному модулю упругости:  $E_M = \frac{E_H l^2 P_M}{P_H l_M^2}$ .

Пересчитать полученные напряжения в модели на напряжения в исследуемом образце:

$$\sigma_H = \frac{\sigma_M l_M^2 P_H}{P_M l_H^2}.$$

## 2.2. Моделирование с использованием аналогий

Использование аналогий предполагает, что для описания состояния одной подсистемы достаточно использовать фазовые переменные двух типов, а в большинстве технических объектов (ТО) можно выделить три типа простейших элементов: элемент диссипации, преобразующий энергию соответствующего данной подсистеме вида в теплоту, и элементы, накапливающие потенциальную или кинетическую энергию.

Аналогию компонентных и топологических уравнений удобно проводить на основе электрической подсистемы. Рассмотрим использование аналогий на примерах подсистем механической, гидравлической (пневматической), тепловой и электрической [3].

### 2.2.1. Электрическая подсистема

Типовыми простейшими элементами электрической подсистемы являются электрическое сопротивление  $R$ , электрическая емкость  $C$  и электрическая индуктивность  $L$ . При описании их функционирования используются фазовые переменные типа потока (сила тока  $I$ ) и типа потенциала (напряжение  $U$ ). Значение напряжения на этих элементах совпадает с разностью значений электрического потенциала на концах элементов, напряжение на элементе источника тока равно его ЭДС [3].

Согласно основным законам электротехники компонентные уравнения этих типовых элементов соответственно имеют вид:

$$I = \frac{U}{R}; \quad I = \frac{CdU}{dt}; \quad U = \frac{LdI}{dt}.$$

Уравнения равновесия (первый закон Кирхгофа) и непрерывности (второй закон Кирхгофа), устанавливающие равенство нулю суммы токов в узлах схемы и суммы напряжений на элементах схемы при их обходе по произвольному контуру, дают топологические уравнения подсистемы:

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0; \quad \sum_i^k U_k = 0,$$

где  $n$  – число ветвей в узле схемы;  $k$  – число элементов в контуре схемы.

### **2.2.2. Механические поступательная и вращательная подсистемы**

Типовыми элементами этих подсистем являются элементы трения, элементы массы и упругие элементы. В качестве фазовых переменных выступают сила  $F$  и скорость  $v$  – для поступательной подсистемы и момент  $M$ , угловая скорость  $\omega$  – для вращательной.

Математические модели элементов трения получаются из уравнений вязкого трения:

$$F = \mu v_{от} = \frac{v_{от}}{(1/\mu)}; \quad M = k\omega_{от} = \frac{\omega_{от}}{(1/k)},$$

где  $\mu$  и  $k$  – коэффициенты диссипации, соответственно, для поступательной и вращательной подсистем;  $v_{от}$ ,  $\omega_{от}$  – относительные скорости контактируемых тел.

Введем понятия механического сопротивления при поступательном движении  $R_M = \frac{1}{\mu}$  и вращательном  $R_{вр} = \frac{1}{k}$ . Тогда

$$F = \frac{v_{от}}{R_M}; \quad M = \frac{\omega_{от}}{R_{вр}}.$$

Математическую модель массы выражает второй закон Ньютона:

$$F = \frac{mdv}{dt}; \quad M = \frac{Jd\omega}{dt},$$

где  $m$  – масса элемента;  $J$  – момент инерции массы относительно ее оси вращения.



Математическая модель упругого элемента получается из закона Гука. Для поступательной подсистемы:

$$\sigma = \frac{E\Delta l}{l},$$

где  $\sigma$  и  $\Delta l$  – соответственно, напряжение и удлинение стержня в продольном направлении;  $E$  – модуль упругости первого рода;  $l$  – начальная длина стержня.

Так как  $\sigma = \frac{F}{S}$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения стержня, после дифференцирования по времени получим:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{SEv_{от}}{l} = cv_{от} \quad \text{или} \quad v_{от} = \frac{1}{c} \frac{dF}{dt} = L_M \frac{dF}{dt},$$

где  $c$  – жесткость;  $v_{от} = \frac{dl}{dt}$  – скорость деформации;  $L_M = \frac{1}{c}$  – податливость.

Для вращательной системы при относительном повороте вала на угол  $\varphi$  получаем аналогичное компонентное уравнение

$$\omega_{от} = \frac{\frac{1}{c_\varphi}}{\frac{dM}{dt}} = L_{вр} \frac{dM}{dt},$$

где  $c_\varphi$  – крутильная жесткость;  $\omega_{от} = \frac{d\varphi}{dt}$  – угловая скорость деформации;  $L_{вр} = \frac{1}{c_\varphi}$  – крутильная податливость.

Топологические уравнения подсистемы получаются из уравнений равновесия (принцип Д'Аламбера) и уравнений непрерывности (сумма абсолютной, переносной и относительной скоростей равна нулю):

$$\sum_{j=1}^n F_j = 0; \quad \sum_{i=1}^k v_{оти} = 0;$$

$$\sum_{j=1}^n M_j = 0; \quad \sum_{i=1}^k \omega_{оти} = 0.$$

Особенностью механической поступательной системы является то, что в топологических уравнениях фигурируют не алгебраические, а геометрические суммы. Другими словами, топологические уравнения в виде алгебраических сумм должны записываться для проекций сил и скоростей на каждую ось координат.

**Пример 3.** Необходимо произвести исследование динамики суппорта станка (рис. 2.2).

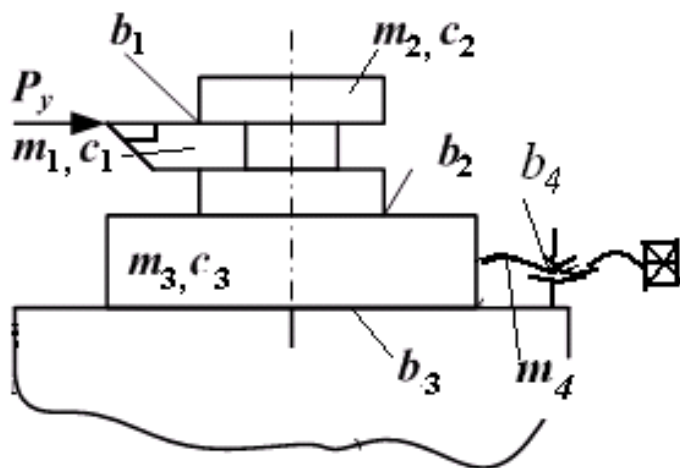


Рис. 2.2. Расчетная схема

1. Обозначаем параметры, которые используем в расчетной схеме (рис. 2.2).
2. Изобразим механическую цепь (рис. 2.3).

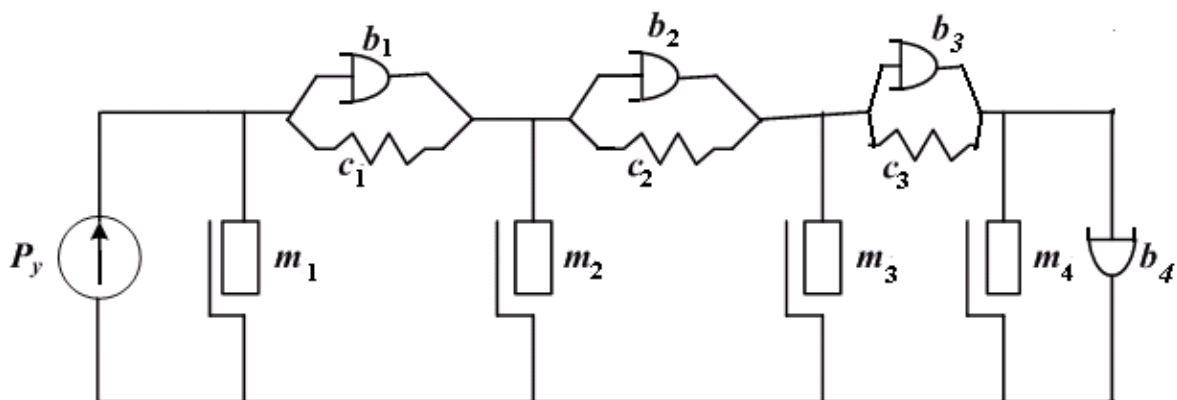


Рис. 2.3. Эквивалентная механическая цепь

Построим на основе механической цепи эквивалентную электрическую (рис. 2.4).

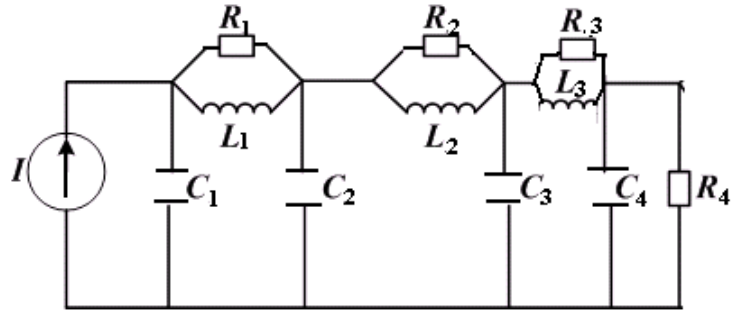


Рис. 2.4. Электрическая схема

3. С помощью тензометрического динамометра определяем динамическую составляющую сил резания и строим график изменения силы во времени (рис. 2.5).



Рис. 2.5. График изменения силы резания

4. По известному характеру изменения силы резания выбираем источник силы тока для электрической цепи (рис. 2.6).



Рис. 2.6. График изменения силы тока источника питания

5. По известным параметрам элементов привода станка определяем коэффициенты приведения:

$$k_{1m} = \frac{m_2}{m_1}; \quad k_{2m} = \frac{m_3}{m_1}; \quad k_{3m} = \frac{m_4}{m_1};$$

$$k_{1b} = \frac{b_2}{b_1}; \quad k_{2b} = \frac{b_3}{b_1}; \quad k_{3b} = \frac{b_4}{b_1};$$

$$k_{1c} = \frac{c_2}{c_1}; \quad k_{2c} = \frac{c_3}{c_1}.$$

6. Выбрав базовые элементы электрической цепи с параметрами  $c_1$ ,  $L_1$ ,  $R_1$ , рассчитываем параметры остальных элементов, используя коэффициенты приведения механической цепи:

$$c_2 = k_{1m}c_1; \quad c_3 = k_{2m}c_1; \quad \dots;$$

$$R_2 = k_{1b}R_1; \quad R_3 = k_{2b}R_1; \quad \dots;$$

$$L_2 = k_{1c}L_1; \quad L_3 = k_{2c}L_1; \quad \dots.$$

7. Из полученных элементов собирается электрическая цепь (рис. 2.4).

8. Используя электронный осциллограф, определяются силы тока в узлах и падение напряжения на каждом элементе.

Характер изменения силы тока в соответствующем узле соответствует характеру изменения силы реакции между соответствующими элементами механического устройства (рис. 2.7).

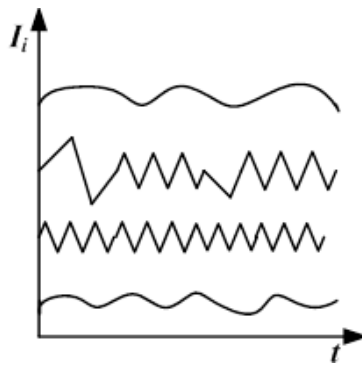


Рис. 2.7. Результаты эксперимента

Характер изменения падения напряжения соответствует характеру изменения относительных скоростей элементов привода.

### 2.2.3. Гидравлическая и пневматическая подсистемы

Основными фазовыми переменными этих подсистем являются массовый расход  $Q_m$  и давление  $p$ .

Рассмотрим компонентные уравнения гидравлической подсистемы для участка трубопровода длиной  $l$  и диаметром  $d$ .

Потери давления  $\Delta p = p_1 - p_2$  ( $p_1, p_2$  – давление на начальном и конечном участках трубопровода, соответственно) при стационарном ламинарном течении жидкости с кинематической вязкостью  $\nu$  могут быть определены по формуле Пуазейля:

$$\Delta p = \frac{128\nu l Q_m}{\pi d^4} = R_r Q_m, \text{ или } Q_m = \frac{\Delta p}{R_r},$$

где  $R_r = \frac{128\nu l}{\pi d^4}$  – гидравлическое сопротивление.

Любая полость в гидравлической подсистеме может рассматриваться как емкость. Если полость заполнена жидкостью, компонентное уравнение гидравлической системы получается из обобщенного закона Гука:

$$Q_m = \frac{C_r dp}{dt},$$

где  $C_r$  – приведенная гидравлическая емкость,  $C_r = \frac{Vp}{E_{ж}}$ ;  $V$  – объем емкости;  $E_{ж}$  – модуль упругости жидкости.

Инерционные свойства жидкости позволяют учесть одномерное уравнение Эйлера (закон движения идеальной жидкости):

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{l},$$

где  $v$  – скорость течения жидкости;  $\delta = p_2 - p_1$  – изменение давления на участке трубопровода длиной  $l$ , обусловленное инерционными свойствами жидкости.

Умножив обе части уравнения на  $pS$  и заменив  $\delta p$  на  $\Delta p$ , получим:

$$\frac{dQ_m}{dt} = \frac{S}{l} \Delta p, \text{ или } \Delta p = \frac{l}{S} \frac{dQ_m}{dt} = \frac{L_r dQ_m}{dt},$$

где  $L_r = \frac{l}{S}$  – гидравлическая индуктивность.

Топологические уравнения гидравлической подсистемы выводятся на основе законов, утверждающих, что сумма потоков в любой общей точке системы и сумма перепадов давления на замкнутом контуре равны нулю:

$$\sum_{j=1}^n Q_{mj} = 0; \quad \sum_{i=1}^k \Delta p_i = 0.$$

Для пневматической подсистемы все уравнения имеют аналогичный вид, разница будет заключаться только в значениях коэффициентов.

При составлении эквивалентных схем гидравлических и пневматических подсистем за базовый узел обычно принимается внешняя среда. Любой трубопровод можно представить состоящим из нескольких секций, эквивалентная схема каждой из которых имеет вид, представленный на рис. 2.8.

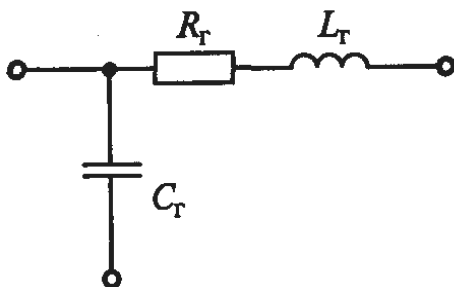


Рис. 2.8. Эквивалентная схема секции трубопровода

Пользователь, учитывая конкретные условия, может пренебречь какими-либо из элементов  $R_T$ ,  $C_T$  или  $L_T$ . Резервуары, скорость течения жидкости в которых относительно мала и поэтому потери на трение и изменение кинетической энергии потока незначительны, часто изображаются только емкостными ветвями, подсоединенными одним полюсом к базовому элементу, а вторым – к другим элементам трубопровода. Участок трубы относительно большой длины и с малым поперечным сечением изображается ветвями гидравлического сопротивления и гидравлической индуктивности, включенными последовательно; изменением объема жидкости пренебрегают.

На рис. 2.9 представлены гидравлическая и эквивалентная схемы гидравлической подсистемы.

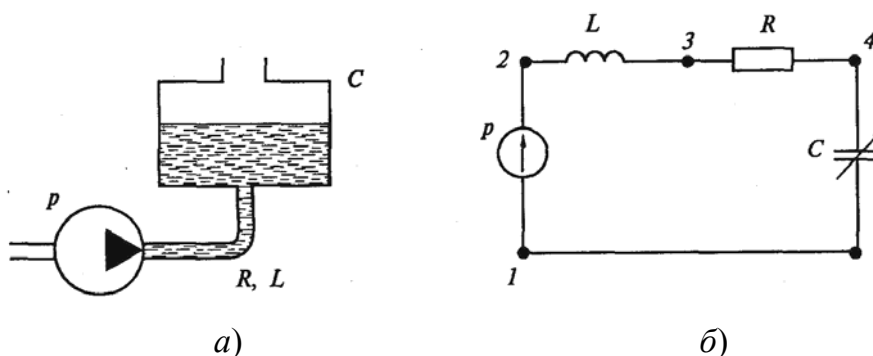


Рис. 2.9. Схема гидравлической подсистемы:  
а – общая; б – эквивалентная

Гидравлический насос  $p$  качает жидкость, которая по трубопроводу поступает в открытый резервуар  $C$ . В эквивалентной схеме насос представлен источником давления  $p$ , участок трубопровода – индуктивной  $L$  и резистивной  $R$  ветвями, а резервуар – переменной гидравлической емкостью  $C$ .

#### 2.2.4. Тепловая подсистема

Компонентные и топологические уравнения для тепловой подсистемы идентичны по форме уравнениям рассмотренных подсистем за исключением того, что в тепловой подсистеме присутствуют только два типа основных элементов: элементы теплопроводности и теплоемкости. Фазовыми переменными являются температура  $T$  и тепловой поток  $\Phi = \frac{dQ}{dt}$ , где  $Q$  – количество теплоты.

При выделении элементов твердое тело разбивается на участки, каждый из которых характеризуется средней теплоемкостью  $C_T$ . По определению:

$$C_T = \frac{dQ}{dT},$$

следовательно,

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{C_T dT}{dt}, \text{ или } \Phi = \frac{C_T dT}{dt}.$$

Кроме того, каждый участок обладает теплопроводностью. Математическая модель теплового сопротивления получается из уравнения Фурье:

$$q = -\lambda \text{grad}T,$$

где  $q$  – плотность теплового потока;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $T$  – температура.

Если рассматривать передачу теплоты вдоль участка однородного тела с площадью поперечного сечения  $S$  и длиной  $l$ , то

$$\Phi = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{l} = \frac{T_1 - T_2}{R_T} = \frac{\Delta T}{R_T},$$

где  $R_T = \frac{l}{\lambda S}$  – тепловое сопротивление;  $\Delta T = T_1 - T_2$  – разность температур на границах элемента.

Для участков контакта твердого тела с жидкой или газообразной средой тепловое сопротивление определяется теплопередачей конвекцией. Компонентное уравнение элемента сопротивления имеет в данном случае аналогичный вид, но  $R_T = \frac{l}{\alpha S}$ , где  $S$  – площадь контакта;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи.

Топологические уравнения для тепловых подсистем следуют из уравнения теплового баланса для стационарного процесса теплопередачи и закона, устанавливающего, что сумма изменений температуры при обходе по замкнутому контуру равна нулю:

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j = 0; \quad \sum_{i=1}^k \Delta T_i = 0.$$

В уравнениях рассмотренных подсистем используются фазовые переменные двух типов: типа потока и типа потенциала, а также компоненты трех типов: типа сопротивления  $R$ , типа емкости  $C$  и типа индуктивности  $L$  (у тепловой подсистемы компонент типа индуктивности  $L$  отсутствует). Нетрудно убедиться, что при правильном выборе аналогий (табл. 2.1) для описания всех рассмотренных подсистем можно использовать идентичные уравнения.

Таблица 2.1

**Фазовые переменные и компоненты для различных подсистем**

Подсистемы	Фазовые переменные		Компоненты		
	типа потока, $I$	типа потенциала $U$	типа	типа	типа
Электрическая	Ток $I$	Напряжение $U$	Сопротивление $R$	Емкость $C$	Индуктивность $L$
Механическая поступательная	Сила $F$	Скорость $v$	Механическое сопротивление $R_M$	Масса $m$	Податливость $L_M$
Механическая вращательная	Момент $M$	Угловая скорость $\omega$	Вращательное сопротивление $R_{вр}$	Момент инерции $J$	Крутильная податливость $L_{вр}$
Гидравлическая (пневматическая)	Расход $Q_m$	Давление $p$	Гидравлическое сопротивление $R_G$	Гидравлическая емкость $C_G$	Гидравлическая индуктивность $L_G$
Тепловая	Тепловой поток $\Phi$	Температура $T$	Тепловое сопротивление $R_T$	Теплоемкость $C_T$	–



Данное обстоятельство дает возможность автоматизировать процесс получения моделей объектов после выполнения предварительных процедур, связанных с получением формального представления структуры этих объектов.

### **2.2.5. Формальное представление структуры объекта на макроуровне**

Для формального представления структуры ТО удобно использовать графические изображения, облегчающие пользователю восприятие и приводящие к представлению модели в той или иной схемной форме. Топологические уравнения систем, представленных выше, записывались применительно к узлам и контурам. Следовательно, сама форма топологических уравнений требует отождествления участков реальной структуры объектов или характеризующих эти участки величин с некоторыми ветвями и узлами, поэтому первым этапом моделирования объектов должна быть замена реального объекта некоторым графическим представлением, состоящим из связанных между собой ветвей, – графами и эквивалентными схемами.

Графы применяются не только для представления топологических уравнений макроуровня. Ими широко пользуются для получения структурных и функциональных моделей на разных уровнях проектирования, а также при решении задач синтеза структуры.

*Графом* называют совокупность вершин (узлов) и связывающих их ребер (ветвей). Если для ребер графа указываются определенные направления, такой граф является *направленным*. Любая последовательность ребер, в которой соседние ребра инцидентны одной и той же вершине, называется *маршрутом*. Термин «инцидентность» означает соотношение объектов типа «проходит через...» или «находится на...». Если в маршруте нет повторяющихся ребер, маршрут называют *цепью*. Если цепь начинается и заканчивается в одной и той же вершине, имеем *цикл*. *Связным графом* называют граф, в котором можно указать маршрут, связывающий любые вершины. Частным случаем связного графа без циклов является *дерево*. Его ребра называют *ветвями*.

Граф – удобное средство отображения структуры проектируемого ТО. Чаще всего при таком отображении вершины графа отождествляются с элементами структуры, а ребра соответствуют связям между элементами. И наоборот, при моделировании ТО ребрами изображают элементы, а вершинами – связи между элементами.

Если граф отображает только такие структурные особенности, как способ связи элементов друг с другом, то *эквивалентная схема* содержит более полную информацию об объекте, отображает физическую сущность отдельных элементов. Рассмотрим особенности представления моделей в виде эквивалентных схем.

В разных областях техники применяют специфические системы обозначений элементов на эквивалентных схемах. Будем использовать в дальнейшем единую систему обозначений для элементов всех подсистем, обычно применяемую при изображении электрических эквивалентных схем, а при составлении схем придерживаться правил, приведенных ниже:

1. Эквивалентная схема, как и граф, состоит из множества ветвей и множества узлов.

2. Каждая ветвь относится к одному из пяти возможных типов, изображенных на рис. 2.10.

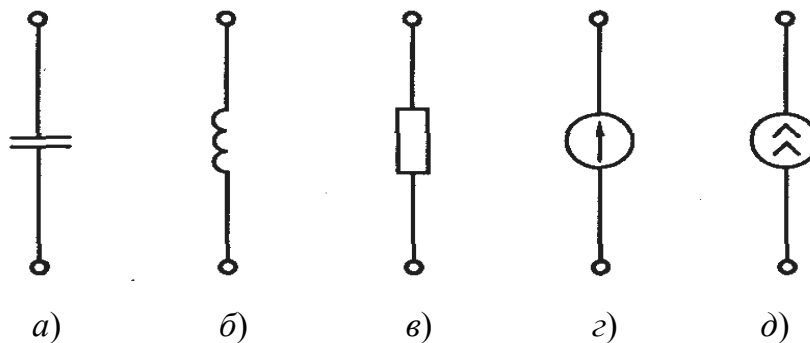


Рис. 2.10. Типы ветвей в эквивалентных схемах:  
 а – емкостная; б – индуктивная; в – резистивная;  
 г – источника типа потенциала; д – источника типа потока

3. Каждой ветви соответствует свое компонентное уравнение:

– для емкостной (рис. 2.10, а):  $I = \frac{CdU}{dt}$ ;

– для индуктивной (рис. 2.10, б):  $U = \frac{LdI}{dt}$ ;

– для резистивной (рис. 2.10, в):  $I = \frac{U}{R}$ ;

– для ветви источника типа потенциала (рис. 2.10, г) – уравнение, связывающее разность потенциалов  $U$  на узлах данной ветви с независимой переменной  $t$  и, возможно (для зависимой ветви), с фазовыми переменными других ветвей:  $U = f_1(\vec{V}, t)$ , где  $\vec{V}$  – вектор фазовых переменных;  $t$  – время. В частном случае:  $U = \text{const}$ ;

– для ветви источника типа потока (рис. 2.10,  $\delta$ ) – уравнение, связывающее поток  $I$  в данной ветви со временем  $t$  и, возможно (для зависимой ветви), с фазовыми переменными других ветвей:  $I = f_2(\vec{V}, t)$ . В частном случае:  $I = \text{const}$ .

4. Каждому узлу схемы соответствует определенное значение фазовой переменной типа потенциала, а каждой ветви – значения переменных  $I$  и  $U$ , фигурирующих в компонентных уравнениях. Соединение ветвей друг с другом, т. е. образование узлов, должно отражать взаимодействие элементов в системе. Выполнение этого условия обеспечивает справедливость топологических уравнений для узлов и контуров схемы.

*Зависимая ветвь* – ветвь, параметр которой ( $U$  в источнике типа потенциала,  $I$  в источнике типа потока или  $R, C, L$ ) зависит от каких-либо фазовых переменных.

Для отражения взаимосвязей подсистем в их эквивалентные схемы вводят специальные преобразовательные элементы. Различают три вида связей подсистем. Трансформаторная и гираторная связи выражают соотношения между фазовыми переменными двух подсистем. Этим типам связей соответствуют элементы, представляемые парами источников тока или напряжения. Их называют *зависимыми источниками*. Третий вид связи выражает влияние фазовых переменных одной подсистемы на параметры элементов другой и задается в виде зависимостей  $C, L$  или  $R$  от фазовых переменных. Примеры изображения связей в эквивалентных схемах приведены на рис. 2.11. Здесь запись вида  $A(B)$  означает, что фазовая переменная  $A$  является функцией фазовой переменной  $B$ .

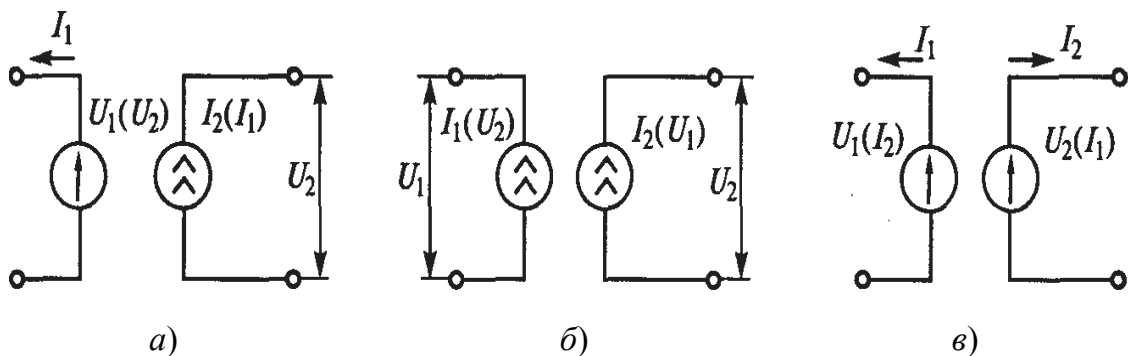


Рис. 2.11. Примеры изображения связей в эквивалентных схемах:  
 а – трансформаторная; б – гираторная; в – комбинированная

Таким образом, если нужно отобразить только топологические уравнения, достаточно использования графов; если нужно отобразить топологические и компонентные уравнения, целесообразно воспользоваться эквивалентными схемами. Следует, однако, отметить, что если эквивалентные схемы строить по приведенным выше правилам, то между ними и графами в отношении структуры имеется строгое соответствие. Тогда можно проставить у ветвей графа условные буквенные обозначения типов ветвей. В этом случае граф содержит ту же информацию, что и эквивалентная схема, и можно с равным успехом использовать оба графических представления объекта.

Рассмотрим общие правила составления эквивалентной схемы на примере механической системы. Сначала выбирается инерциальная система отсчета, с которой связывается система координат (обычно декартова). После этого разрабатывается структурная схема, отражающая состав объекта и связи его элементов. Схема должна содержать все элементы, свойства которых предполагается учитывать в рамках поставленной задачи. На схеме наносятся источники внешних силовых и кинематических воздействий в виде сил (моментов) и скоростей. Инерционные элементы представляются в виде сосредоточенных масс. Элементы, отражающие упругие и демпфирующие свойства и внешние воздействия, часто ориентируются относительно осей координат. Назначаются обобщенные координаты системы – взаимно-однозначные функции координат, определяющие положение объекта в пространстве в каждый момент времени. Число обобщенных координат равно числу степеней свободы. Обобщенные координаты фигурируют в дальнейшем в компонентных и топологических уравнениях: фазовые переменные типа потока являются функциями производных по времени от обобщенных координат (функциями обобщенных скоростей).

На основании структурной схемы строится эквивалентная схема:

- задается базовый узел, который в дальнейшем интерпретируется как инерциальная система отсчета. В приведенных ниже примерах он обозначен номером 0;

- для каждого тела с учитываемыми инерционными свойствами в эквивалентной схеме выделяется отдельный узел. Если тело имеет несколько степеней свободы относительно осей координат, каждой из них должен соответствовать свой узел тела. Узел тела в дальнейшем интерпретируется как само тело, совершающее движение относительно соответствующей оси координат: к узлу прикладываются силы (моменты), действующие на тело в выбранном направлении, потенциал узла харак-

теризует скорость тела в этом направлении относительно инерциальной системы координат (обобщенную скорость);

- между узлом тела и базовым узлом включается емкостная ветвь; она характеризует силу (момент) инерции;

- трение между контактируемыми телами отражается резистивной ветвью, включенной между их узлами;

- упругие элементы, соединяющие тела, отражаются индуктивной ветвью между соответствующими узлами схемы;

- внешние силы (моменты) и внешние источники скорости, действующие на систему, учитываются в схеме, соответственно, ветвями источника типа потока и источника типа потенциала, включенными между базовым узлом и узлом элемента, к которому они приложены;

- узлы схемы нумеруются в произвольном порядке, начиная с 1.

В ряде случаев невозможно непосредственно связать все ветви схемы подобным образом. Наличие в системе преобразователей скорости и силы (момента) таких, например, как рычажные механизмы или зубчатые передачи, приводит к тому, что фазовые переменные контактируемых элементов требуют дополнительного согласования. То же самое может возникнуть, когда тело совершает одновременно поступательное и вращательное движение. В подобных случаях при построении эквивалентной схемы используются схемы, разработанные для отдельных подсистем и объединенные между собой с помощью трансформаторных связей. Если в системе не учитываются упругие свойства связи между контактируемыми телами, в одну из подсистем между базовым узлом и узлом тела помещают зависимый источник типа потока, а в другую – зависимый источник типа потенциала. При этом безразлично, какой из источников в какую подсистему будет включен. Если в системе присутствуют элементы податливости между контактируемыми телами, их характеристики должны быть приведены к фазовой переменной типа потока одной из связываемых подсистем, а сами они должны быть включены в эту подсистему посредством ветвей, один конец которых подсоединен к узлу тела. Между другим концом ветвей и базовым узлом помещают зависимый источник типа потенциала. Зависимый источник типа потока размещают между узлом тела и базовым узлом другой подсистемы.

Следует отметить, что скорости и силы (моменты) – это векторы, и поэтому при размещении в схеме их источников следует правильно указывать их направление. Более подробно правила составления эквивалентных схем с зависимыми источниками будут рассмотрены в примерах.

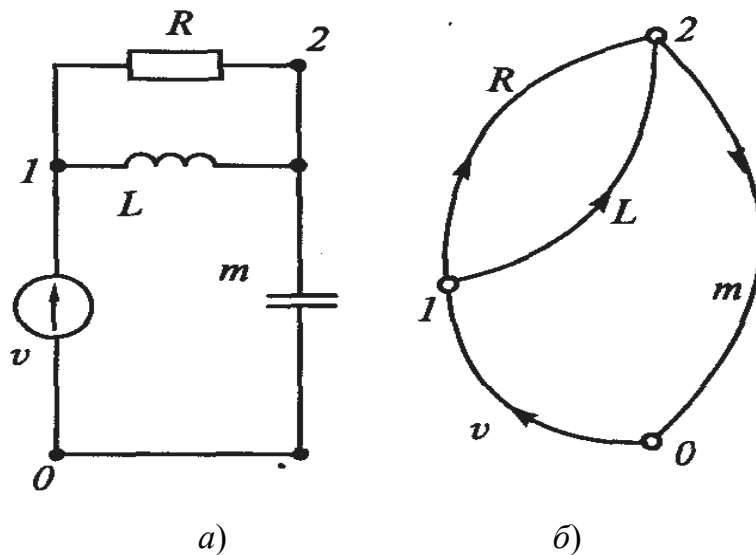


Рис. 2.12. Одномассовая колебательная система:  
 а – эквивалентная схема; б – граф одномассовой  
 колебательной системы

На рис. 2.12 изображены эквивалентная схема и соответствующий ей граф для примера одномассовой колебательной системы.

### 2.2.6. Разнородные физические подсистемы

В сложных ТО часто используют элементы, для описания процессов которых требуются фазовые переменные, характерные для разных физических систем. В подобных случаях целесообразно составить системы уравнений отдельно для электрической, тепловой и механической частей (подсистем) сложной системы. Взаимосвязь частей должна проявляться в объединении таких автономно составленных систем уравнений в общую систему уравнений на определенном этапе моделирования. В эквивалентных схемах каждая подсистема физической системы имеет свое самостоятельное изображение.

Физические элементы, в которых происходит преобразование переменной одной подсистемы на переменные другой, должны иметь описание в более чем одной подсистеме. Компонентные уравнения этих элементов должны содержать соотношения между фазовыми переменными двух разнородных подсистем.

Ранее предполагалось, что внешние параметры при анализе процессов в подсистеме считаются постоянными (например температура) или зависящими только от времени (например параметры внешней нагрузки). Если же анализу подвергаются процессы взаимодействия подсистем, то очевидно, что многие из внешних параметров уже не могут

быть заданы до начала анализа как функции времени. Их текущие значения становятся известными только в процессе совместного решения систем уравнений всех подсистем.

Таким образом, взаимовлияние подсистем может быть отражено, если внешние параметры одной подсистемы рассматривать как функции фазовых переменных другой подсистемы. При составлении эквивалентных схем это взаимовлияние находит отражение либо включением дополнительных ветвей типа источников, либо учетом зависимостей внутренних параметров (сопротивлений, емкостей, индуктивностей) уже имеющих в схеме ветвей от фазовых переменных других подсистем.

**Пример 4.** Рассмотрим гидромеханическую систему с силовым гидравлическим цилиндром, схема которой представлена на рис. 2.13, а.

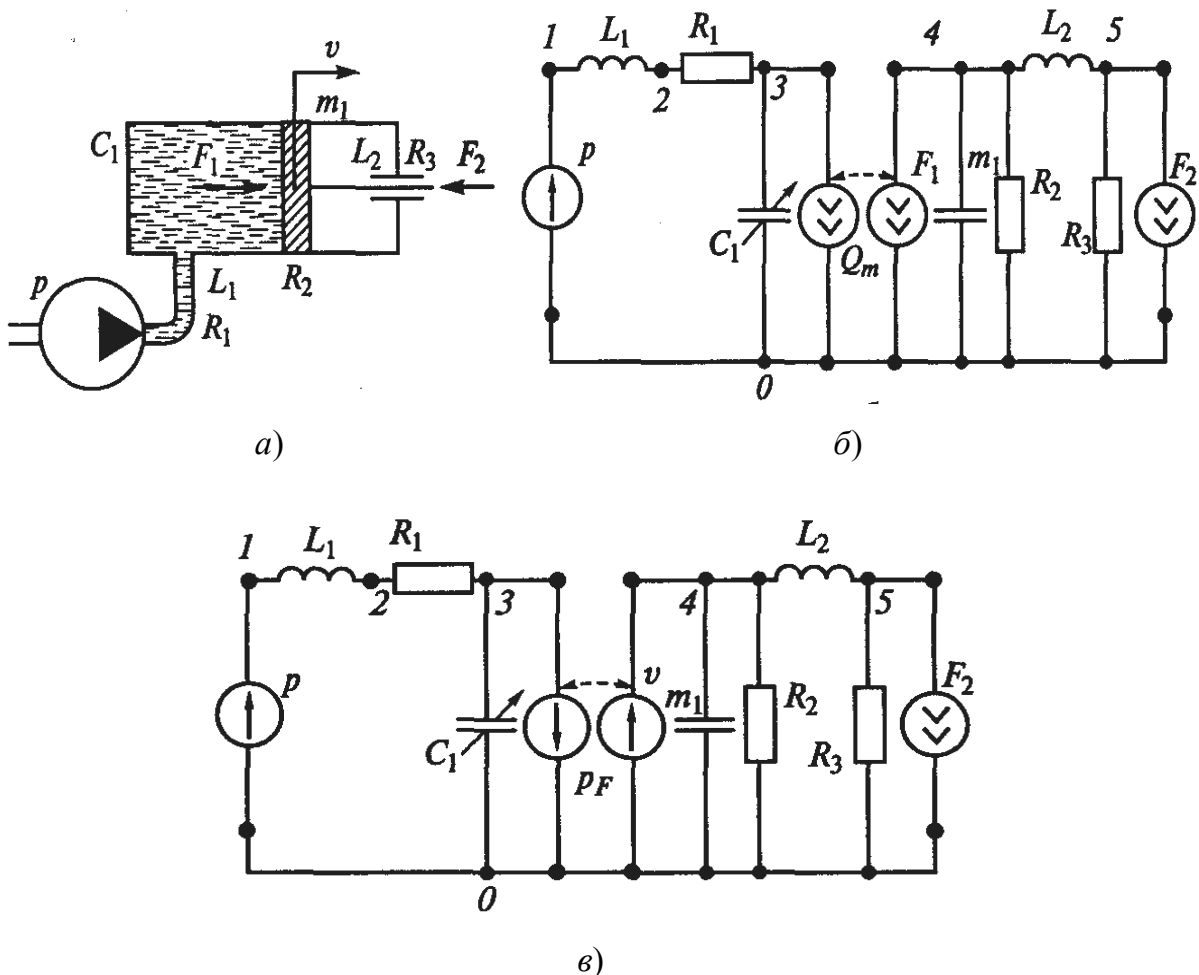


Рис. 2.13. Схема нагруженного гидропривода (силового гидроцилиндра):

а – гидромеханическая система; б – связь подсистем включением ветвей  $Q_m$  и  $F_1$ ; в – связь подсистем включением ветвей  $p_F$  и  $v$

Насос качает жидкость в цилиндр и заставляет перемещаться поршень, нагруженный внешней силой. Давление жидкости на выходе из насоса и закон изменения силы на штоке поршня известны.

Можно выделить две подсистемы: гидравлическую и механическую поступательную. Для каждой из них строится своя эквивалентная схема. В эквивалентной схеме гидравлической подсистемы насос отображается ветвью внешнего источника давления  $p$ , потери в трубопроводе учитываются ветвями  $L_1$  и  $R_1$ , а влияние внутренней полости гидроцилиндра – емкостной ветвью  $C_1$ . В схеме механической подсистемы учитываются инерционные свойства поршня (ветвь  $m_1$ ), трение поршня о стенки цилиндра (ветвь  $R_2$ ), трение штока в контакте с уплотнением (ветвь  $R_3$ ), податливость штока (ветвь  $L_2$ ) и внешняя нагрузка (ветвь  $F_2$ ).

Взаимодействие подсистем заключается в том, что давление  $p$  в цилиндре (узел 3) создает силу  $F_1$ , действующую на поршень. Под ее воздействием поршень перемещается со скоростью  $v$  (узел 4), изменяя поток  $Q_m$  в цилиндре. На рис. 2.13, б связь подсистем учитывается включением в схему зависимых источников типа потока – ветви  $Q_m$  и  $F_1$ , компонентные уравнения которых имеют вид:  $F_1 = pS$ ;  $Q_m = \rho S v$ , где  $S$  – площадь поршня;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости.

Взаимодействие подсистем можно учесть и другим образом. Поток жидкости в полости цилиндра вызывает перемещение поршня со скоростью  $v$ . При этом давление жидкости в цилиндре зависит от силы, действующей со стороны поршня. Тогда связь между подсистемами может быть учтена включением зависимых источников типа потока – ветви  $p_F$  и  $v$  (рис. 2.13, в), компонентные уравнения которых имеют вид:

$$p = \frac{F_1}{S}, \quad v = \frac{Q_m}{S\rho}.$$



### 3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель планирования эксперимента – получение максимума информации о свойствах исследуемого объекта при минимуме опытов. Такой подход обусловлен высокой стоимостью экспериментов как физических, так и вычислительных, а также необходимостью построения адекватной модели.

Планирование осуществляют как для активного, так и пассивного эксперимента. Планируемый активный эксперимент при прочих равных условиях точнее и информативнее, а иногда и дешевле пассивного. Это следует учитывать при выборе вида эксперимента. В вычислительном эксперименте (ВЭ), в отличие от физического (ФЭ), нет никаких ограничений в выборе управляемых факторов и характера их изменения. Поэтому ВЭ обычно всегда реализуются как активные. При планировании активных экспериментов используются следующие принципы [1]:

- отказ от полного перебора всех возможных состояний объекта;
- постепенное усложнение структуры математической модели (ММ);
- сопоставление результатов эксперимента с величиной случайных помех;
- рандомизация опытов;
- оптимальное планирование эксперимента.

Детальное представление о свойствах поверхности отклика может быть получено лишь при условии использования густой дискретной сетки значений факторов, покрывающей все факторное пространство.

В отсутствие априорной информации о свойствах функции отклика нет смысла сразу строить сложную ММ объекта. Если проверка этой модели на адекватность не дает удовлетворительного результата, ее постепенно усложняют путем изменения структуры (например, повышая степень полинома, принятого в качестве ММ, или вводя в модель дополнительные факторы, и т. п.). При этом используются результаты опытов, выполненных при построении простой модели, и проводится некоторое количество дополнительных экспериментов.

При большом уровне случайной помехи получается большой разброс значений функции отклика  $\vec{Y}$  в опытах, проведенных в одной и той же точке плана. В этом случае оказывается, что чем выше уровень помехи, тем с большей вероятностью простая модель окажется работоспособной. Чем меньше уровень помехи, тем точнее должна быть ММ.

Кроме случайной помехи при проведении эксперимента может иметь место систематическая помеха. Наличие этой помехи практически никак не обнаруживается и результат ее воздействия на функцию не поддается контролю. Однако если путем соответствующей организации проведения экспериментов искусственно создать случайную ситуацию, то систематическую помеху можно перевести в разряд случайных. Такой принцип организации эксперимента называют *рандомизацией* систематически действующих помех.

Наличие помех приводит к ошибкам эксперимента. Ошибки подразделяют на *систематические* и *случайные*, соответственно наименования вызывающих их факторов – помех.

В активных экспериментах ошибки характерны только для определяемых значений функций отклика.

Рандомизацию экспериментов осуществляют только в физических экспериментах. Следует отметить, что в этих экспериментах систематическую ошибку может породить неточное задание значений управляемых факторов, обусловленное некачественной калибровкой приборов для их измерения (инструментальная ошибка), конструктивными или технологическими факторами.

К факторам в активном эксперименте предъявляются определенные требования. Они должны быть:

- 1) *управляемыми* (установка заданных значений и поддержание постоянными в процессе эксперимента);
- 2) *совместными* (их взаимное влияние не должно нарушать процесс функционирования объекта);
- 3) *независимыми* (уровень любого фактора должен устанавливаться независимо от уровней остальных);
- 4) *однозначными* (одни факторы не должны быть функцией других);
- 5) *непосредственно влияющими на выходные параметры*.

Если при реализации трех первых требований в ФЭ возникают сложности и даже невозможность их осуществления, то необходима замена активного эксперимента пассивным.

Функции отклика должны быть:

- 1) *численно измеряемыми*;
- 2) *с четким физическим смыслом*;
- 3) *однозначными* (характеризовать только одно свойство объекта);
- 4) *информативными* (полностью характеризовать определенное свойство объекта);
- 5) *статистически эффективными* (измеряться с достаточной точностью с целью сокращения дублирования опытов).

### 3.1. Основы регрессионного анализа

Регрессионный анализ проводится с целью получения по экспериментальным данным регрессионных моделей (РМ), представляющих собой эквивалентную физическую модель ЭФМ. Задачей регрессионного анализа является определение параметров ЭФМ объектов проектирования или исследования, т. е. определение коэффициентов уравнений ЭФМ при выбранной их структуре [1].

Регрессионный анализ включает три основных этапа:

- 1) статистический анализ результатов эксперимента;
- 2) получение коэффициентов регрессионной модели;
- 3) оценку адекватности и работоспособности полученной ЭФМ

технической системы.

Поскольку параметры фактических моделей  $\vec{b}$  определяют по результатам ограниченного количества экспериментов, то получаемые их значения являются оценками истинных коэффициентов регрессии  $\vec{\beta}$ . Под структурой ЭФМ понимается вид математических соотношений между факторами  $\vec{X}$ ,  $\vec{Z}$  и откликом  $\vec{Y}$ . Функциями отклика  $\vec{Y}$  являются выходные параметры технической системы, характеризующие ее эффективность и качество процессов функционирования. Часть выходных параметров системы может быть принята в качестве критериев оптимальности.

Как уже отмечалось, структура ЭФМ выбирается на основе априорной информации, используя принцип постепенного ее усложнения. Параметры ЭФМ определяются методами регрессионного анализа. При этом нет необходимости различать виды факторов, т. е. подразделять факторы на управляемые  $\vec{X}$  и неуправляемые  $\vec{Z}$ . Поэтому в дальнейшем все они будут обозначаться буквой  $\vec{X}$ . Тогда ЭФМ можно представить векторным уравнением регрессии вида

$$\vec{Y} = \vec{\varphi}(\vec{X}, \vec{b}). \quad (3.1)$$

Определение параметров  $\vec{b}$  этой модели будем рассматривать на примере одного уравнения  $Y = \varphi(\vec{X}, \vec{b})$ . Для определения параметров используются результаты ФЭ. Результаты ФЭ можно представить функцией вида

$$Y = \varphi(\vec{X}) + \varepsilon, \quad (3.2)$$

где  $\varepsilon$  – аддитивная помеха случайного характера с нормальным законом распределения.

Так как каждый эксперимент проводится при определенном сочетании уровней факторов  $\vec{X}$ , то функцию  $\varphi(\vec{X})$  представим выражением

$$\varphi(\vec{X}) = \sum_{j=0}^d \beta_j f_j(\vec{X}), \quad (3.3)$$

где  $\beta_j$  –  $j$ -й элемент вектора искомых коэффициентов уравнения регрессии  $\vec{\beta} = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_d)^T$ ;  $f_j(\vec{X})$  –  $j$ -я базисная функция – элемент вектора базисных функций:

$$f_j(\vec{X}) = [f_0(\vec{X}), f_1(\vec{X}), \dots, f_d(\vec{X})]^T.$$

В качестве базисных функций используют переменные простейших полиномов, системы ортогональных полиномов (Эрмита, Лежандра и др.), тригонометрические функции. Наиболее часто используются простейшими полиномами первой и второй степеней. Например, полином первой степени, описывающий функцию отклика  $y$  при двух факторах  $x_1$  и  $x_2$ , может иметь вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (3.4)$$

или полиномы с парным влиянием факторов:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2, \quad (3.5)$$

или полином второй степени:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2. \quad (3.6)$$

Базисные функции в этом случае имеют вид:

$$f_0(\vec{X}) = 1; \quad f_1(\vec{X}) = x_1; \quad f_2(\vec{X}) = x_2; \quad f_3(\vec{X}) = x_1 x_2; \\ f_4(\vec{X}) = x_1^2; \quad f_5(\vec{X}) = x_2^2.$$

Если уравнение регрессии имеет вид выражений (3.4), (3.5), его называют уравнением *линейной регрессии*, а если содержит факторы во второй и более высокой степени – *нелинейной регрессией* (регрессией соответствующего порядка).

Линейная регрессия может представлять как линейную ММ, так и нелинейную, в зависимости от того, содержит ли она *линейные эффекты* (3.4) или наряду с ними также *парные эффекты* (3.5). Парным

эффектом называют эффект совместного влияния нескольких факторов ( $x_1x_2$ ) на  $y$ .

Как всякий статистический метод, регрессионный анализ применим при определенных предпосылках (постулатах):

1. Аддитивная помеха  $\varepsilon$  – случайная нормально распределенная величина с параметрами  $m_\varepsilon = 0$  и  $\sigma_\varepsilon^2 = \text{const}$ . В этом случае функция отклика  $\vec{Y}$  также случайная величина с нормальным законом распределения. Гипотезу о нормальном распределении  $\vec{Y}$  можно проверить по критерию Пирсона.

2. Постоянство дисперсии помехи означает, что интенсивность ошибки определения  $\vec{Y}$  не меняется при изменении уровня факторов в процессе ФЭ. Выполнение этого постулата проверяется по критерию однородности дисперсии в разных точках спектра плана.

3. Значения факторов в активном ФЭ – неслучайные величины. Это означает, что установление каждого фактора на заданном уровне и удерживание его на этом уровне во время опыта точнее, чем ошибка воспроизводимости.

4. Значения помехи  $\varepsilon$  в различных точках опыта некоррелированы. Для обеспечения этого требования используется рандомизация опытов. В пассивном ФЭ условие некоррелированности помехи обеспечивают путем соответствующего выбора временного интервала съема информации об условиях и результатах опытов.

5. Векторы-столбцы базисных функций должны быть линейно независимыми. Выполнение этого требования необходимо для получения отдельных оценок  $\vec{b}$  всех коэффициентов регрессии  $\vec{\beta}$ . В активном ФЭ оно обеспечивается соответствующим выбором спектра плана эксперимента. При этом число опытов  $N$  (без учета дублирования) должно быть не меньше, чем число оцениваемых коэффициентов  $N_B$ , т. е.  $N > N_B$ .

В пассивном эксперименте линейная зависимость между столбцами практически исключается, так как факторы неуправляемы и принимают случайные значения в разных опытах, но может наблюдаться сильная коррелированность столбцов, что повлечет за собой большие ошибки вычисления коэффициентов регрессии. Для выявления коррелированности столбцов проводят корреляционный анализ результатов пассивного эксперимента.

### 3.2. Оценка параметров регрессионной модели

Исходными данными для получения оценок параметров РМ технической системы (т. е. оценок  $\vec{b}$  искомых коэффициентов регрессии  $\vec{\beta}$ ) является информация о значениях управляемых факторов  $X$  и функции отклика  $\vec{Y}$ . Эту информацию можно представить в виде матрицы  $X$  значений факторов во всех  $N$  экспериментах, предусмотренных спектром плана экспериментов, и вектора-столбца  $\vec{Y}$  полученных в этих экспериментах значений функции отклика  $Y$ :

$$X = \begin{bmatrix} \vec{X}_1 \\ \vec{X}_2 \\ \dots \\ \vec{X}_i \\ \dots \\ \vec{X}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & X_{Nj} & \dots & X_{Nn} \end{bmatrix};$$

$$\vec{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N)^T,$$

где  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$  – вектор-строка значений факторов в  $i$ -м эксперименте;  $X_{ij}$  – значение  $j$ -го фактора в  $i$ -м эксперименте;  $n$  – количество факторов;  $N$  – количество экспериментов;  $y_i$  – значение функции отклика  $Y$  в  $i$ -м эксперименте (если проводились параллельные опыты, т. е. дублирование опытов, то вместо  $y_i$  используются оценки их математических ожиданий, т. е. выборочные средние  $\bar{y}_i$ ).

Значения базисных функций во всех экспериментах представляют собой матрицу  $F$ , называемую *матрицей базисных функций*:

$$F = \begin{bmatrix} \vec{f}_1(\vec{X}_1) \\ \vec{f}_2(\vec{X}_2) \\ \dots \\ \vec{f}_i(\vec{X}_i) \\ \dots \\ \vec{f}_N(\vec{X}_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{10} & f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1k} & \dots & f_{1d} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2k} & \dots & f_{2d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{i0} & f_{i1} & f_{i2} & \dots & f_{ik} & \dots & f_{id} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{N0} & f_{N1} & f_{N2} & \dots & f_{Nk} & \dots & f_{Nd} \end{bmatrix},$$

где  $f_{ik}$  – значение  $k$ -й базисной функции в  $i$ -м эксперименте;  $\vec{f}_i(\vec{X}_i) = (f_{i0}, f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{id})$  – вектор-строка значений базисных функций в  $i$ -м эксперименте.

Используя информацию об  $X$ ,  $\vec{Y}$  и  $F$ , необходимо найти оценки коэффициентов регрессии, представляемые вектором-столбцом

$$\vec{b}^T = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_k, \dots, b_d), \quad (3.7)$$

где  $b_k$  – значение оценки коэффициента регрессии при базисной функции  $f_k(X)$ .

Так как функция отклика  $\vec{Y}$  – случайная величина, поскольку на ее значения в различных экспериментах оказывает влияние случайная помеха  $\varepsilon$ , то оценки коэффициентов регрессии будут случайными величинами.

Уравнение регрессии устанавливает зависимость между оценкой математического ожидания функции отклика  $\bar{y}$  и факторами  $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Общий вид этой зависимости:

$$\bar{y} = \sum_{k=0}^d b_k f_k(\vec{X}). \quad (3.8)$$

В связи с наличием помехи значение функции отклика в  $i$ -м эксперименте  $y_i$  будет отличаться от  $\bar{y}_i$ . Для определения  $y_i$  можно составить выражение

$$y_i = b_0 f_{i0} + b_1 f_{i1} + \dots + b_k f_{ik} + \dots + b_d f_{id} + \varepsilon_i, \quad (3.9)$$

где  $\varepsilon_i$  – невязка уравнения регрессии в  $i$ -м эксперименте.

Невязка характеризует отклонение значений функции отклика в экспериментах от получаемых с помощью ММ (3.8). Она возникает по двум причинам: из-за ошибки эксперимента и из-за непригодности (приближенности) выбранной структуры физической модели (ФМ). Причем эти причины смешаны и нельзя сказать, какая из них преобладает.

Если постулировать, что модель пригодна, то невязка будет порождаться только ошибкой эксперимента. Тогда для определения коэффициентов уравнения (3.8) невязку надо минимизировать. Для этого в регрессионном анализе используется *метод наименьших*

квадратов (МНК). Составляется функция, представляющая собой сумму квадратов невязок, и осуществляется ее минимизация:

$$E = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2. \quad (3.10)$$

Подставим значение  $\varepsilon_i$  из выражения (3.9):

$$E = \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 f_{i0} + b_1 f_{i1} + \dots + b_k f_{ik} + \dots + b_d f_{id})]^2 \rightarrow \min. \quad (3.11)$$

В выражении (3.11) коэффициенты  $b_k$  рассматриваются как неизвестные переменные, которые наилучшим образом соответствуют полученным результатам эксперимента. Значения этих коэффициентов, при которых достигается минимум функции  $E$ , принимаются в качестве оценок коэффициентов регрессии. Минимум функции  $E$  имеет место при равенстве нулю частных производных этой функции по переменным  $b_0, b_1, \dots, b_d$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial b_0} &= -2 \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 f_{i0} + b_1 f_{i1} + \dots + b_d f_{id})] f_{i0} = 0; \\ \frac{\partial E}{\partial b_1} &= -2 \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 f_{i0} + b_1 f_{i1} + \dots + b_d f_{id})] f_{i1} = 0; \\ \frac{\partial E}{\partial b_d} &= -2 \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 f_{i0} + b_1 f_{i1} + \dots + b_d f_{id})] f_{id} = 0. \end{aligned}$$

После преобразований получим систему линейных неоднородных алгебраических уравнений относительно искомым оценок коэффициентов регрессии  $b_0, b_1, \dots, b_d$ :

$$\begin{aligned} b_0 \sum_{i=1}^N f_{i0}^2 + b_1 \sum_{i=1}^N f_{i1} f_{i0} + \dots + b_d \sum_{i=1}^N f_{id} f_{i0} &= \sum_{i=1}^N y_i f_{i0}; \\ b_0 \sum_{i=1}^N f_{i0} f_{i1} + b_1 \sum_{i=1}^N f_{i1}^2 + \dots + b_d \sum_{i=1}^N f_{id} f_{i1} &= \sum_{i=1}^N y_i f_{i1}; \\ \dots & \\ b_0 \sum_{i=1}^N f_{i0} f_{id} + b_1 \sum_{i=1}^N f_{i1} f_{id} + \dots + b_d \sum_{i=1}^N f_{id}^2 &= \sum_{i=1}^N y_i f_{id}. \end{aligned} \quad (3.12)$$



Очевидно, что коэффициенты при неизвестных переменных этой системы уравнений являются элементами матрицы  $\Phi$ , определяемой из выражения

$$\Phi = F^T F, \quad (3.13)$$

в котором  $F$  представляет собой матрицу базисных функций. Значения элементов матрицы  $F$  известны из проведенного эксперимента. Следовательно, элементы матрицы  $\Phi$  оказываются известными коэффициентами системы уравнений (3.12). Выпишем матрицу  $\Phi$ :

$$\Phi = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N f_{i0}^2 + \sum_{i=1}^N f_{i1} f_{i0} + \dots + \sum_{i=1}^N f_{id} f_{i0}; \\ \sum_{i=1}^N f_{i0} f_{i1} + \sum_{i=1}^N f_{i1}^2 + \dots + \sum_{i=1}^N f_{id} f_{i1}; \\ \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^N f_{i0} f_{id} + \sum_{i=1}^N f_{i1} f_{id} + \dots + \sum_{i=1}^N f_{id}^2. \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Матрицу  $\Phi$  называют *информационной матрицей Фишера*. Она содержит  $(d + 1)$  строк и  $(d + 1)$  столбцов, причем элемент  $j$ -й строки  $k$ -го столбца представляет собой сумму  $\sum_{i=1}^N f_{ij} f_{ik}$ . Матрица  $\Phi$  симметрична относительно главной диагонали, что упрощает составление системы алгебраических уравнений (3.12) для ФМ.

Систему уравнений (3.12) можно записать в матричной форме:

$$\Phi \vec{b} = F^T \vec{Y}. \quad (3.15)$$

Система уравнений (3.12) имеет единственное решение, если определитель матрицы  $\Phi$  не равен нулю. В этом случае матрица  $\Phi$  будет не вырожденной. Выполнение пятой предпосылки регрессионного анализа, изложенной в предыдущем пункте, исключает возникновение вырожденности. Решение системы уравнений (3.12) обычно осуществляют методом Гаусса. При небольшом числе определяемых коэффициентов  $b_k$  можно использовать правило Крамера. Полученные методом наименьших квадратов оценки  $b_0, b_1, \dots, b_d$  действительных значений коэффициентов регрессии  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_d$  обладают следующими свойствами:

1) математические ожидания оценок  $M[b_j] = \beta_j, j = 0, d,$  т. е. оценки  $b_j$  несмещенные;

2) дисперсии оценок коэффициентов регрессии минимальны:

$$\sigma_{b_j}^2 = M\{(b_j - M[b_j])^2\} = M\{(b_j - \beta_j)^2\} = \sigma_\varepsilon^2 C_{jj}, \quad (3.16)$$

а корреляционный момент:

$$\begin{aligned} \mu_{11}(b_j, b_k) &= M\{(b_j - M[b_j])(b_k - M[b_k])\}; \\ \mu_{11}(b_j, b_k) &= M\{(b_j - \beta_j)(b_k - \beta_k)\} = \sigma_\varepsilon^2 C_{jk}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

где  $C_{jj}, C_{jk}$  – элементы матрицы  $\Phi^{-1}$ , обратной к информационной;  $\sigma_\varepsilon^2$  – дисперсия случайной помехи;

3) оценки подчиняются совместному  $(d + 1)$  – мерному нормальному распределению.

### 3.3. Планы экспериментов и их свойства

При проведении активного эксперимента задается определенный план варьирования факторов, т. е. эксперимент заранее планируется.

*План экспериментов* – это совокупность данных, определяющих число, условия и порядок реализации опытов.

*Планирование экспериментов* – выбор плана экспериментов, удовлетворяющего заданным требованиям.

*Точка плана* – упорядоченная совокупность численных значений факторов, соответствующая условиям проведения эксперимента, т. е. точка факторного пространства, в которой проводится эксперимент. Точке плана с номером  $i$  соответствует вектор-строка:

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}).$$

Общая совокупность таких векторов  $X_i = 1, L$  образует план экспериментов, а совокупность различающихся векторов, число которых обозначим  $N$ , – *спектр плана*.

В активных экспериментах факторы могут принимать только фиксированные значения. Фиксированное значение фактора называют *уровнем фактора*. Количество принимаемых уровней факторов зависит от выбранной структуры ФМ и принятого плана экспериментов.

Минимальный –  $X_{j\min}$  и максимальный –  $X_{j\max}$ ,  $j = 1, n$  ( $n$  – число факторов), уровни всех факторов выделяют в факторном пространстве некоторый гиперпараллелепипед, представляющий собой *область планирования*. В области планирования находятся все возможные значения факторов, используемые в экспериментах.

Вектор  $\vec{X}^0 = (X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0)$  задает точку центра области планирования. Координаты этой точки обычно выбирают из соотношения

$$X_j^0 = \frac{X_{j\max} + X_{j\min}}{2}. \quad (3.18)$$

Точку  $\vec{X}^0$  называют *центром экспериментов*. Она определяет основной уровень факторов  $X_j^0$ ,  $j = 1, n$ . Центр экспериментов стремятся выбрать как можно ближе к точке, которая соответствует искомым оптимальным значениям факторов. Для этого используется априорная информация об объекте.

*Интервалом* (или *шагом*) *варьирования фактора*  $X_j$  называют величину, вычисляемую по формуле

$$\Delta X_j = \frac{X_{j\max} - X_{j\min}}{2}, \quad j = 1, n. \quad (3.19)$$

Факторы нормируют, а их уровни кодируют. В кодированном виде верхний уровень обозначают +1, нижний –1, а основной 0. Нормирование факторов осуществляют на основе соотношения

$$x_j = \frac{X_j - X_j^0}{\Delta X_j}, \quad j = 1, n. \quad (3.20)$$

Для переменных  $x_j$  начало координат совмещено с центром экспериментов, а в качестве единиц измерения используются интервалы варьирования факторов.

Центр экспериментов находится в точке 0 с координатами  $X_1^0, X_2^0$ . Точки 1–4 являются точками плана эксперимента. Например, значения факторов  $X_1$  и  $X_2$  в точке 1 равны, соответственно,  $X_{1\min}$  и  $X_{2\min}$ , нормированные их значения  $x_{1\min} = -1$ ,  $x_{2\min} = -1$ .

В дальнейшем будем предполагать, что в планах активных экспериментов факторы нормированы. План эксперимента представляется в матричной форме и задается либо матрицей плана, либо матрицей спектра плана в совокупности с матрицей дублирования.

*Матрица плана* представляет собой прямоугольную таблицу, содержащую информацию о количестве и условиях проведения экспериментов. Строки матрицы плана соответствуют экспериментам, а столбцы – факторам. Размерность матрицы плана  $L \times n$ , где  $L$  – число экспериментов,  $n$  – число факторов. При проведении повторных (дублирующих) опытов в одних и тех же точках плана матрица плана содержит ряд совпадающих строк.

*Матрица спектра плана* – это матрица, в которую входят только различающиеся между собой строки матрицы плана. Размерность матрицы спектра плана  $N \times n$ , где  $N$  – число точек плана, различающихся между собой хотя бы одной координатой.

Матрица спектра плана имеет вид:

$$X = \begin{bmatrix} \vec{X}_1 \\ \vec{X}_2 \\ \dots \\ \vec{X}_i \\ \dots \\ \vec{X}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & X_{Nj} & \dots & X_{Nn} \end{bmatrix},$$

где  $X_i$  – вектор, определяющий нормированные значения координат точки плана в  $i$ -м эксперименте;  $X_{ij}$  – нормированное значение  $j$ -го фактора в  $i$ -м эксперименте.

*Матрица дублирования* – квадратная диагональная матрица  $m$ , диагональные элементы которой равны числам параллельных опытов в соответствующих точках спектра плана:

$$m = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix}.$$

Опыты при выполнении эксперимента проводятся в последовательности, предусмотренной матрицей плана. Эта матрица составляется лишь при необходимости рандомизации экспериментов, когда в результатах ФЭ можно ожидать наличие систематических ошибок. Для выбора случайной последовательности экспериментов исполь-

зуется таблица равномерно распределенных случайных чисел. Первое число таблицы выбирают произвольно, а затем, начиная с этого числа, выписывают  $L$  чисел таблицы, где  $L$  – число экспериментов (с учетом их дублирования). При этом числа, большие  $L$ , а также уже выписанные, отбрасываются.

В ФЭ эксперименты проводят в соответствии с матрицей спектра плана, так как предполагается отсутствие систематических ошибок и нет необходимости в рандомизации опытов. Планы учитывают как особенности структуры ММ, так и требования их эффективности с позиций повышения точности получаемых моделей и снижения затрат на проведение экспериментов.

При построении линейных моделей или нелинейных, содержащих только взаимодействия факторов, но без квадратов этих факторов (регрессий первого порядка), каждый фактор можно варьировать только на двух уровнях. Для получения таких моделей используют *планы первого порядка*.

Известно несколько разновидностей планов первого порядка. Эти планы различаются в зависимости от структуры ММ. Они предназначены для планирования следующих видов экспериментов: *однофакторных (классических) экспериментов; полных факторных экспериментов; дробных факторных экспериментов*.

Если в ММ входят факторы в квадрате или с более высокими степенями, то необходимо не менее трех уровней варьирования факторов. При построении квадратичных моделей применяют *планы второго порядка*.

Планы различают по степени насыщенности и композиционности. План называют *насыщенным*, если общее число точек плана равно числу неизвестных параметров ММ. Такой план позволяет получить ФМ при минимальных затратах, так как обеспечивает минимум числа экспериментов.

Планы называются *композиционными*, если в их спектр в качестве составной части входят точки спектра плана, который был реализован при построении более простой модели. Композиционность плана позволяет реализовать принцип постепенного усложнения модели при минимальных затратах, так как при этом используются результаты экспериментов, выполненных для получения простой модели. Многие планы второго порядка являются композиционными.

Важное свойство плана – *ортогональность*. У ортогональных планов информационная матрица Фишера  $\Phi$  диагональная, а столбцы матрицы базисных функций  $F$  попарно ортогональны. Для ортогонального плана при заданных значениях диагональных элементов матрицы  $\Phi$  дисперсии  $\sigma_{b_k}^2$  оценок коэффициентов регрессии  $b_k$  минимальны. Эти оценки получаются независимыми, что существенно облегчает их вычисление и анализ.

При изменении вида плана изменяется матрица  $\Phi$ , что влияет на дисперсии оценок коэффициентов регрессии. Различают  $D$ -,  $A$ - и  $E$ -оптимальные планы, обеспечивающие различные формы эллипсоидов рассеивания оценок.  $D$ -оптимальный план минимизирует обобщенную дисперсию оценок коэффициентов регрессии и обеспечивает минимальный объем эллипсоида их рассеивания.  $A$ -оптимальный план минимизирует среднюю дисперсию всех оценок, а эллипсоид имеет наименьшую сумму квадратов длин осей. Эллипсоид рассеивания у  $E$ -оптимального плана имеет минимальную длину своей наибольшей оси.

В зависимости от возможностей предсказания отклика по уравнению регрессии различают планы ротатабельные и униформные. План называется *ротатабельным*, если дисперсия предсказания отклика постоянна на фиксированном расстоянии от центра эксперимента. *Униформный план* обеспечивает практически постоянное ее значение в некоторой области факторного пространства. Свойства ротатабельности или униформности обеспечиваются соответствующим выбором точек матрицы спектра плана. Задача выбора оптимального плана довольно сложная и в большинстве случаев не имеет аналитического решения.

### 3.3.1. План линейного вида

Классический эксперимент предназначен для получения линейного вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n. \quad (3.21)$$

Однофакторный эксперимент предусматривает поочередное варьирование каждого из факторов при фиксированных на некотором уровне значениях остальных факторов. Фактор  $X_i$  варьировать на двух уровнях  $X_{iB}$  и  $X_{iH}$ , а все остальные при этом должны находиться в точке центра эксперимента  $X_j^0$ ,  $j \neq i$ . Для нормированных факторов

$x_{iB} = +1$ ,  $X_{iH} = -1$ ,  $x_j = 0$ . С учетом этого составим матрицу спектра плана однофакторного эксперимента:

$$X = \begin{bmatrix} -1 & 0 \dots 0 \\ +1 & 0 \dots 0 \\ 0 & -1 \dots 0 \\ 0 & +1 \dots 0 \\ \dots \dots \dots \\ 0 & 0 \dots -1 \\ 0 & 0 \dots +1 \end{bmatrix}.$$

Число точек плана в этом случае  $N = 2n$ , где  $n$  – количество факторов. Точки спектра плана располагаются в центрах граней гиперкуба. На рис. 3.1, а показано расположение точек для двухмерного случая, а на рис. 3.1, б – для трехмерного.

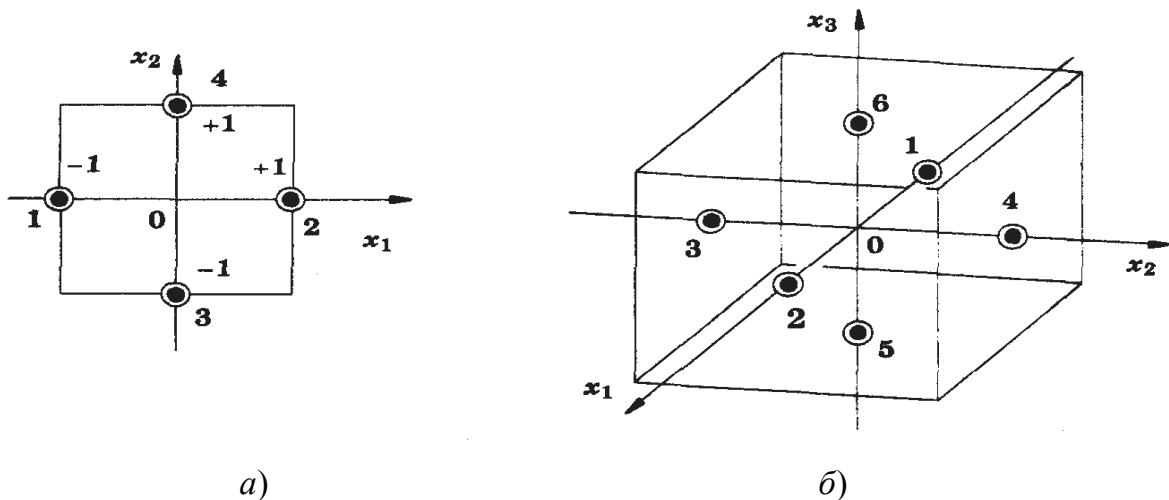


Рис. 3.1. Расположение точек спектра плана однофакторного эксперимента: а – при двух факторах; б – при трех факторах

Вектор базисных функций имеет вид:

$$\vec{f}(\vec{X}) = (1, x_1, x_2, \dots, x_n),$$

а матрица  $F$  численных значений базисных функций отличается от матрицы спектра плана  $X$  только одним дополнительным столбцом, соответствующим базисной функции  $f_0 = (\vec{X}) = 1$ :

$$F = \begin{bmatrix} +1 & -1 & 0 \dots 0 \\ +1 & +1 & 0 \dots 0 \\ +1 & 0 & -1 \dots 0 \\ +1 & 0 & +1 \dots 0 \\ \dots\dots\dots \\ +1 & 0 & 0 \dots -1 \\ +1 & 0 & 0 \dots +1 \end{bmatrix}.$$

Матрица базисных функций  $F$  обладает очевидными свойствами:

$$\sum_{i=1}^N f_k(\vec{X}_i) = 0, \quad k = 1, n; \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=1}^N f_0(\vec{X}_i) = N = 2n; \quad (3.23)$$

$$\sum_{i=1}^N [f_k(\vec{X}_i)]^2 = 2, \quad k = 1, n; \quad (3.24)$$

$$\sum_{i=1}^N [f_0(\vec{X}_i)]^2 = N = 2n; \quad (3.25)$$

$$\sum_{i=1}^N f_j(\vec{X}_i) f_k(\vec{X}_i) = 0, \quad j \neq k \quad j, k = 0, n, \quad (3.26)$$

где  $N$  – число точек спектра плана;  $f_k(\vec{X}_i)$  – значение  $k$ -й базисной функции в  $i$ -м эксперименте.

Согласно выражению (3.26) векторы-столбцы всех базисных функций попарно ортогональны.

Используя свойства (3.21)–(3.26) и выражение (3.14), легко составить информационную матрицу Фишера  $\Phi = F_T F$ :

$$\Phi = \begin{bmatrix} 2n & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & 2 & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 & 2 \dots 0 \\ \dots\dots\dots \\ 0 & 0 & 0 \dots 2 \end{bmatrix}.$$



Так как матрица  $\Phi$  диагональная, то план однофакторного эксперимента ортогональный и коэффициенты регрессии некоррелированы между собой. Для определения дисперсии оценок коэффициентов регрессии (3.21) вычислим обращенную матрицу Фишера:

$$\Phi^{-1} = \begin{bmatrix} 1/2n & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \dots 1/2 \end{bmatrix}.$$

Искомые дисперсии оценок коэффициентов регрессии определяются произведениями дисперсии помехи  $\sigma_{\varepsilon}^2$  на соответствующие диагональные элементы матрицы  $\Phi^{-1}$ :

$$\sigma_{b_0}^2 = \frac{\sigma_{\varepsilon}^2}{2n}; \quad \sigma_{b_k}^2 = \frac{\sigma_{\varepsilon}^2}{2}; \quad k = 1, n.$$

Очевидно, что точность получаемой модели в этом случае невысокая, так как коэффициенты регрессии  $b_k$ ,  $k = 1, n$  (кроме коэффициента  $b_0$ ) имеют высокое значение дисперсии. Поэтому однофакторный эксперимент следует признать явно неудовлетворительным для построения ФМ ТО. В связи с этим в настоящее время он практически не применяется. Следует отметить, что рассмотренный план обладает свойством ротатабельности.

### ***3.3.2. План полных факторных экспериментов***

Спектр плана полных факторных экспериментов (ПФЭ) содержит все возможные комбинации значений факторов на всех уровнях их изменения. Число точек  $N$  спектра плана определяется по формуле

$$N = U^n, \tag{3.27}$$

где  $U$  – число уровней варьирования факторов;  $n$  – количество факторов.

Рассмотрим особенности и свойства ПФЭ, применяемых при построении линейных регрессий вида [1]:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n b_{j,k} x_j x_k + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n \sum_{l=k+1}^n b_{j,k,l} x_j x_k x_l + \dots + b_{1,2,\dots,n} x_1 x_2 \dots x_n. \quad (3.28)$$

Для получения линейной регрессии достаточно варьировать факторы на двух уровнях, т. е.  $U = 2$ . Тогда число точек спектра плана:

$$N = 2^n. \quad (3.29)$$

Такой план принято обозначать ПФЭ  $2n$ .

Рассмотрим порядок составления матрицы спектра плана, полагая, что факторы нормированы и, следовательно, могут принимать значения только либо  $+1$ , либо  $-1$ . Напомним, что столбцы матрицы  $X$  соответствуют значениям факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Для составления матрицы спектра плана используется следующее простое правило: в первой строке матрицы все факторы равны  $-1$ , в первом столбце знаки единиц меняются поочередно; во втором столбце они чередуются через два; в третьем – через 4; в четвертом – через 8 и т. д. по степеням двойки. Следовательно, для каждого последующего столбца частота изменения знака в два раза меньше, чем для предыдущего.

Используя изложенное правило чередования знаков, составим матрицы спектров планов для случаев  $n = 2$  и  $n = 3$ , т. е. для двух и трех факторов. При  $n = 2$  число точек плана  $N = 2^2 = 4$ , а матрица спектра плана имеет вид:

$$X = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ +1 & -1 \\ -1 & +1 \\ +1 & +1 \end{bmatrix},$$

при  $n = 3$   $N = 2^3 = 8$ , а матрица  $X$ :

$$X = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}.$$

Спектры планов можно изобразить в привычной для экспериментатора табличной форме. Точки плана ПФЭ  $2^n$  располагаются в вершинах  $n$ -мерного гиперкуба. На рис. 3.2, а показано расположение точек для двухмерного случая, а на рис. 3.2, б – для трехмерного.

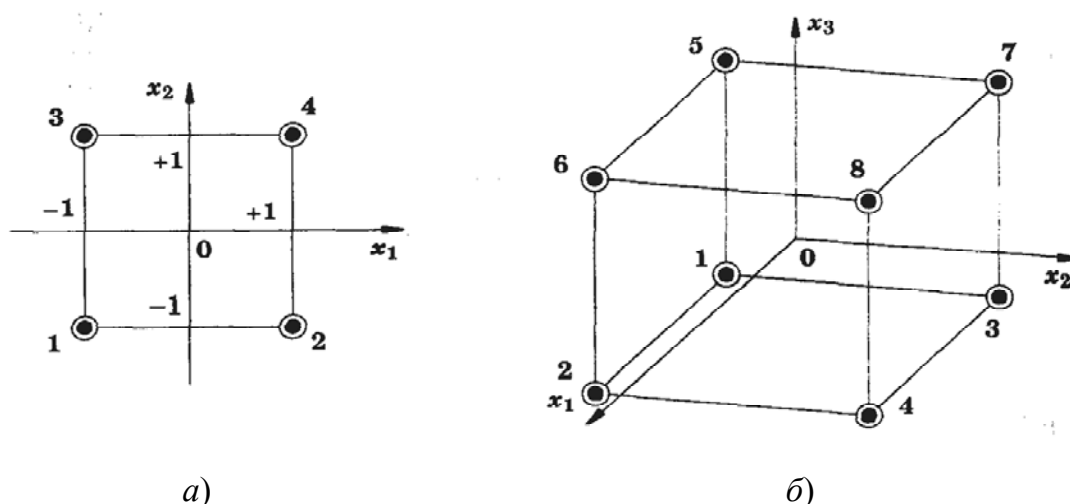


Рис. 3.2. Расположение точек спектра плана ПФЭ  $2^n$ :  
а – при  $n = 2$ ; б – при  $n = 3$

Посредством ПФЭ можно построить как простейшую линейную модель технической системы вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (3.30)$$

так и нелинейную.

Для модели вида (3.30) система базисных функций очевидна:  $f_0(\vec{X}) = 1$ ;  $f_1(\vec{X}) = x_1$ ;  $f_2(\vec{X}) = x_2$ ; ...;  $f_n(\vec{X}) = x_n$ . Число базисных функций в этом случае равно  $n + 1$ .

Определим, какие базисные функции могут входить в ММ, получаемую посредством ПФЭ<sup>n</sup>, чтобы выполнялось требование о линейной независимости векторов-столбцов этих функций. При выполнении этого требования получают отдельные оценки всех коэффициентов регрессии. Линейная независимость столбцов матрицы  $F$  достигается, если в ней отсутствуют полностью совпадающие или полностью противоположные (по знакам) столбцы.

**Пример 1.** Определить влияние глубины и подачи на силу резания. По сведениям из литературы, принимаем вид функции силы резания:

$$P_z = C_p t^{X_p} S^{Y_p}.$$

Логарифмируем принятое выражение:

$$\lg P_z = \lg C_p + X_p \lg t + Y_p \lg S.$$

Вводим обозначения:

$$\lg P_z \rightarrow Y; \lg C_p \rightarrow b_0; X_p \rightarrow b_1; \lg t \rightarrow X_1; Y_p \rightarrow b_2; \lg S \rightarrow X_2.$$

Тогда исходное уравнение примет вид:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2.$$

По предварительным экспериментам выбираем max и min значения параметров:

$$X_{1\max}, X_{1\min}, X_{2\max}, X_{2\min}.$$

Перейдем от абсолютных к относительным параметрам. Для этого найдем среднее значение каждого из параметров:

$$X_{10} = \frac{X_{1\max} + X_{1\min}}{2}; \quad X_{20} = \frac{X_{2\max} + X_{2\min}}{2}.$$

Тогда относительные показатели будут:

$$X'_1 = \frac{X_{1\max} - X_{10}}{|X_{1\max} - X_{10}|} = +1;$$

$$X''_1 = \frac{X_{1\min} - X_{10}}{|X_{1\min} - X_{10}|} = -1.$$

Составляем матрицу планирования экспериментов (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Матрица-таблица планирования экспериментов  
для двух параметров**

Номер эксперимента	$X_1$	$X_2$	Параллельные опыты		
			$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	$X_{11} = +1$	$X_{21} = -1$	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$
2	+	-	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$
3	-	+	$Y_{31}$	$Y_{32}$	$Y_{33}$
4	-	-	$Y_{41}$	$Y_{42}$	$Y_{43}$

Тогда

$$b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} = Y_{1i},$$

где  $Y_{1i}$  – экспериментально полученные значения логарифмов сил резания.

Если  $Y_{1i}$  перенести влево, то получим погрешность:

$$b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} - Y_i = \Delta_i,$$

где  $i$  – номер эксперимента.

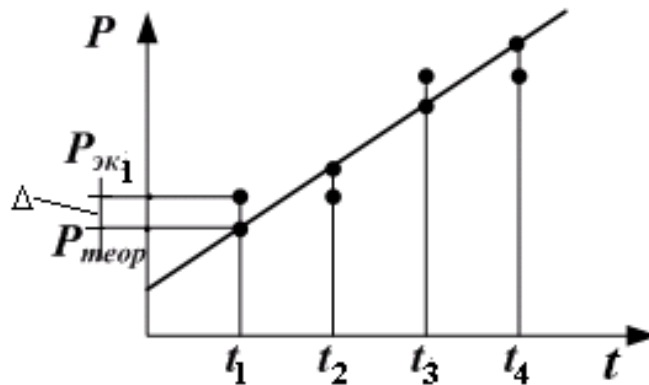


Рис. 3.3. Схема к расчету погрешностей

Возведем в квадрат полученные погрешности:

$$\sum (b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} - Y_i)^2 = \Delta_i^2 \equiv E.$$

Чтобы найти минимум функции погрешностей (рис. 3.3), необходимо частные производные по параметрам  $b$  приравнять к нулю и решить полученную систему:

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial b_0} &= \sum 2(b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} - Y_i) = 0; \\ \frac{\partial E}{\partial b_1} &= \sum 2(b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} - Y_i) X_{1i} = 0; \\ \frac{\partial E}{\partial b_2} &= \sum 2(b_0 + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} - Y_i) X_{2i} = 0.\end{aligned}$$

После преобразования получим:

$$\begin{cases} n + \sum b_{1i} + \sum b_{2i} = \sum Y_i; \\ \sum X_{1i} b_0 + \sum X_{1i}^2 b_1 + \sum X_{1i} X_{2i} b_2 = \sum Y_i X_{1i}; \\ \sum X_{2i} b_0 + \sum X_{1i} X_{2i} b_1 + \sum X_{2i}^2 b_2 = \sum Y_i X_{2i}. \end{cases}$$

Решаем систему методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} n & \sum X_{1i} & \sum X_{2i} \\ \sum X_{1i} & \sum X_{1i}^2 & \sum X_{1i} X_{2i} \\ \sum X_{2i} & \sum X_{1i} X_{2i} & \sum X_{2i}^2 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \sum n Y_i & \sum X_{1i} & \sum X_{2i} \\ \sum Y_i X_{1i} & \sum X_{1i}^2 & \sum X_{1i} X_{2i} \\ \sum Y_i X_{2i} & \sum X_{2i} X_{1i} & \sum X_{2i}^2 \end{vmatrix}, \text{ аналогично } \Delta_2 \text{ и } \Delta_3.$$

Используя полученные определители, находим коэффициенты модели:

$$\frac{\Delta_1}{\Delta} = b_0; \quad \frac{\Delta_2}{\Delta} = b_1; \quad \frac{\Delta_3}{\Delta} = b_2.$$

В общем случае в полиномиальную модель могут входить факторы в любой степени и различные комбинации из их произведений. Так как при нормированных факторах их значения равны +1 или -1, а в качестве показателей степеней факторов принимаются целые числа, то при четных показателях степеней вектор-столбец базисной функции состоит только из +1 и совпадает с вектором-столбцом функции  $f_0(X)$ , а векторы-столбцы всех базисных функций, соответ-

вующих одним и тем же факторам  $x_j$ , возведенным в любые нечетные степени, будут совпадающими. Вместе с тем легко убедиться, что любые комбинации произведений факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$  могут быть в числе базисных функций.

Выпишем выражения линейных регрессий при  $n = 2$  с учетом всех возможных сочетаний взаимодействия факторов:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2. \quad (3.31)$$

При  $n = 3$  получаем:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3. \quad (3.32)$$

Уравнение линейной регрессии, как это видно из (3.28) и (3.32), может содержать следующее предельное количество коэффициентов при различных видах базисных функций:

- один коэффициент  $b_0$  – свободный член уравнения регрессии;
- $n$  коэффициентов  $b_j$  – линейных членов уравнения регрессии;
- $C_n^2$  коэффициентов  $b_{j,k}$  при парных взаимодействиях факторов;
- $C_n^3$  коэффициентов  $b_{j,k,l}$  при тройных взаимодействиях факторов;
- один коэффициент  $b_{1,2,\dots,n}$  при взаимодействии факторов максимального,  $n$ -го порядка.

Выражение для определения общего числа коэффициентов регрессии имеет вид:

$$N_B = 1 + n + C_n^2 + C_n^3 + \dots + C_n^n = 2^n. \quad (3.33)$$

Так как при использовании всех возможных сочетаний факторов в уравнении регрессии число определяемых коэффициентов  $N_B$  равно числу точек  $N$  спектра плана ПФЭ $2^n$ , то такой план является *насыщенным*.

Численные значения  $f_j(\vec{X}_i)$  являются элементами матрицы  $F$ . Матрица  $F$  плана ПФЭ $2^n$  обладает следующими свойствами:

1. *Свойством симметричности относительно центра эксперимента* – алгебраическая сумма элементов каждого столбца матрицы базисных функций, кроме столбца  $f_0(\vec{X})$ , равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N f_j(\vec{X}_i) = 0, \quad j = 1, d, \quad d = N_B - 1, \quad (3.34)$$

где  $f_j(\vec{X}_i)$  – значение  $j$ -й базисной функции, по  $i$ -й строке матрицы  $F$ ;  $i, N$  – номер точки и число точек спектра плана;  $N_B$  – количество базисных функций.

2. *Свойством ортогональности столбцов* – сумма построчных произведений элементов любых двух столбцов равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N f_j(\vec{X}_i) f_k(\vec{X}_i) = 0, \quad j \neq k, \quad j, k = 0, d. \quad (3.35)$$

3. *Свойством нормировки* – сумма квадратов элементов каждого столбца матрицы базисных функций равна числу точек  $N$  спектра плана:

$$\sum_{i=1}^N [f_j(\vec{X}_i)]^2 = N, \quad j = 0, d. \quad (3.36)$$

4. Для столбца базисной функции  $f_0(\vec{X})$  сумма элементов также равна  $N$ :

$$\sum_{i=1}^N f_0(\vec{X}_i) = N. \quad (3.37)$$

Выражения (3.34)–(3.37) записаны в предположении, что дублирование опытов не производится.

Составим информационную матрицу Фишера  $\Phi$ . Выражения (3.35) и (3.36) позволяют определить элементы матрицы  $\Phi$ . Очевидно, что для ПФЭ $2^n$  матрица  $\Phi$  диагональная с постоянными диагональными элементами.

Следовательно, ПФЭ $2^n$  относится к классу ортогональных планов. Так как матрица  $\Phi$  диагональная, то корреляционные моменты оценок коэффициентов регрессии  $\mu_{11}(b_j, b_k) = 0$  и оценки всех коэффициентов регрессии  $b_j, j = 1, N_B$  некоррелированы друг с другом. Кроме того, все коэффициенты регрессии оцениваются с одинаковой точностью, так как диагональные элементы матрицы  $\Phi$  одинаковы. Дисперсия оценок коэффициентов:

$$\sigma_{bj}^2 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{N}. \quad (3.38)$$

Для линейной модели вида (3.30) план ПФЭ $2^n$  является  $A$ - и  $E$ -оптимальным и ротатабельным, а для модели (3.28) –  $D$ -оптимальным.



### 3.3.3. План дробных факторных экспериментов

Наряду с отмеченными положительными качествами ПФЭ он имеет существенный недостаток: увеличение количества факторов приводит к быстрому росту числа экспериментов, что обусловлено степенной зависимостью (3.27). Например, при  $n = 10$  спектр плана содержит  $N = 2^{10} = 1024$  эксперимента. Кроме того, необходимо дублирование экспериментов.

План полных факторных экспериментов позволяет построить ФМ, которая учитывает влияние на функцию отклика выбранных факторов и всех возможных сочетаний взаимодействий этих факторов. Но поскольку структура ФМ выбирается на основе априорной информации о физических свойствах исследуемого объекта, то весьма сложно представить себе влияние на характеристики его функционирования эффектов взаимодействий выше второго или третьего порядка. Обычно при построении многофакторной ФМ ограничиваются парными или, в крайнем случае, отдельными тройными взаимодействиями факторов. В этом случае ПФЭ оказывается избыточным, так как число точек спектра плана  $N$  значительно больше количества коэффициентов регрессии  $N_B$ . В результате возникает возможность сокращения числа экспериментов. Но при этом, естественно, должно соблюдаться условие возможности оценки коэффициентов регрессии по результатам экспериментов, которое выражается соотношением  $N \geq N_B$ .

Во многих случаях на начальной стадии моделирования технической системы в связи с отсутствием необходимой информации о влиянии на ее выходные параметры различных факторов (внутренних или внешних параметров) строят линейную модель вида (3.30). Например, при трех факторах выбирают модель в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3. \quad (3.39)$$

В этом уравнении четыре коэффициента регрессии, а при  $n = 3$  спектр плана ПФЭ согласно выражению (3.29) содержит восемь точек, т. е. предусматривает восемь экспериментов в различных точках факторного пространства. Следовательно, четыре эксперимента оказываются избыточными и их можно было бы исключить, естественно, при условии выполнения принятых предпосылок регрессионного анализа, прежде всего, ортогональности столбцов матрицы базисных функций  $F$ .

При построении ФМ, использующих упрощенные уравнения регрессий, когда  $N > N_B$ , применяют дробные факторные эксперимен-

ты (ДФЭ). Наибольшее распространение имеют регулярные планы ДФЭ типа  $2^{n-p}$ , т. е. ДФЭ  $2^{n-p}$ , где  $n$  – число факторов,  $p$  – степень дробности ДФЭ. Планы ДФЭ принято называть *репликами* с указанием их степени дробности. Так, план ДФЭ  $2^{n-1}$  называют *полуреplikой* ПФЭ  $2^n$  (1/2-реплика); ДФЭ  $2^{n-2}$  – 1/4-реплика ПФЭ  $2^n$ ; ДФЭ  $2^{n-3}$  – 1/8-реплика ПФЭ  $2^n$  и т. д. Полуреплика сокращает число экспериментов в два раза по сравнению с ПФЭ, 1/4-реплика – в четыре раза и т. д.

При построении матрицы спектра плана ДФЭ  $2^{n-p}$  необходимо обеспечить выполнение условий, описываемых выражениями (3.34)–(3.37), принимая во внимание, что число точек спектра этого плана определяется по формуле

$$N = 2^{n-p}. \quad (3.40)$$

Условия (3.34)–(3.37) удовлетворяются, если в матрице базисных функций  $F$  отсутствуют полностью совпадающие или полностью противоположные столбцы, что позволяет получить раздельное оценивание всех коэффициентов регрессии.

При выборе степени дробности ДФЭ должно выполняться условие:

$$N \geq N_B. \quad (3.41)$$

Выбранные базисные функции для ДФЭ составляют лишь некоторую часть базисных функций соответствующего ПФЭ. Назовем эти функции *существенными переменными*, характеризующими в наибольшей мере физические свойства ТО.

Процедура построения спектра плана ДФЭ  $2^{n-p}$  содержит четыре этапа.

*Этап 1. Выбор структуры уравнения регрессии и определение степени дробности ДФЭ.* При этом исходят из условия выполнения соотношения (3.41).

*Этап 2. Выбор ведущих факторов и построение для них матрицы спектра плана,* определяющего программу их изменения в ходе эксперимента.

Число  $k$  ведущих факторов принимают равным разности между количеством факторов  $n$  и степенью дробности ДФЭ:

$$k = n - p. \quad (3.42)$$

Для выбранных ведущих факторов  $x_1, x_2, \dots, x_k$  строят план ПФЭ  $2^k$ , используя правило чередования знаков.

*Этап 3. Построение матрицы  $X$  спектра плана ДФЭ  $2^{n-p}$ .*

Часть этой матрицы составляет матрица спектра плана ПФЭ  $2^k$ , а во вторую часть должны войти столбцы матрицы для остальных факторов  $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n$ , количество которых равно:

$$p = n - k. \quad (3.43)$$

Столбцы матрицы  $X$ , соответствующие этим факторам, определяют путем перемножения соответствующих столбцов ведущих факторов. Для этого используют генерирующие соотношения. *Генерирующим соотношением* называется алгебраическое выражение, устанавливающее связь между одним из факторов  $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n$  и произведением какой-либо комбинации ведущих факторов  $x_1, x_2, \dots, x_k$ .

Чтобы получаемые столбцы были ортогональными, для каждого из них задается отдельное генерирующее соотношение (количество этих соотношений равно  $p$ ). Выбор генерирующих соотношений, вообще говоря, произволен. Однако в качестве генерирующих нельзя использовать те произведения ведущих факторов, которые входят в состав существенных переменных, так как в этом случае в матрице базисных функций  $F$  окажутся совпадающие столбцы: для одного из факторов  $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n$  и одного из взаимодействий факторов из числа существенных переменных.

Генерирующее соотношение имеет вид:

$$x_{k+i} = x_j x_l x_m, \dots, i, \quad i = 1, p, \quad (3.44)$$

где  $x_{k+i}$  – фактор, не включенный в число ведущих (для него определяется столбец матрицы  $X$  спектра плана ДФЭ  $2^{n-p}$ );  $x_j, x_l, x_m, \dots$  – ведущие факторы.

Количество ведущих факторов, входящих в генерирующее соотношение (3.44), может быть произвольным, но соотношения (3.44) для всех  $x_{k+i}$  должны быть разными.

*Этап 4. Проверка пригодности полученного спектра плана.*

Для этого необходимо построить матрицу базисных функций  $F$  и проверить, нет ли в ней совпадающих или полностью противоположных столбцов, т. е. выяснить, обладает ли матрица  $F$  свойством ортогональности столбцов, определяемым выражением (3.35). Если в матрице  $F$  нет совпадающих или противоположных столбцов, полученный спектр плана ДФЭ  $2^{n-p}$  пригоден для решения поставленной задачи. В противном случае выполняются последовательно следующие процедуры до тех пор, пока не будет обеспечена ортогональность: вы-

бираются иные генерирующие соотношения; изменяется набор ведущих факторов; уменьшается степень дробности плана  $p$ .

При ограниченных возможностях проведения опытов степень дробности плана сохраняют, а изменяют структуру уравнения регрессии (например, используют иные взаимодействия факторов или исключают какую-либо базисную функцию, соответствующую одному из взаимодействий высшего порядка).

Таким образом, регулярные планы ДФЭ  $2^{n-p}$  обладают теми же свойствами, что и планы ПФЭ  $2^n$ . Матрица  $F$  удовлетворяет выражениям (3.34)–(3.37). Информационная матрица Фишера  $\Phi$  диагональная. Дисперсию оценок коэффициентов регрессии определяют по формуле (3.38). Планы ДФЭ  $2^{n-p}$  ортогональны. Для линейных моделей они ротабельны,  $A$ - и  $E$ -оптимальны, насыщенные планы  $D$ -оптимальны. Поскольку планы ДФЭ значительно экономичнее планов ПФЭ, они получили широкое практическое применение. В частности, их используют для анализа чувствительности целевой функции к вариации параметров ТО в процессе их отсеивания и отбора для осуществления оптимизации.

**Пример 2.** Для оценки адекватности модели достаточно, чтобы количество степеней свободы  $F$  было равно 1.

Допустим,  $k = 3$ ,  $N = 8$ . Примем  $F = 1$ , тогда для оценки адекватности достаточно  $N = g + F = 4 + 1 = 5$ ;  $g = k + 1$ .

Для  $k = 4$ ;  $N = 2^k = 16$ ; при  $F = 1$ ;  $N_p = 5 + 1 = 6$ .

Если выбранная модель неполная квадратичная при четырех параметрах, то для оценки модели выбираем модель полного факторного эксперимента с тремя параметрами (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Матрица-таблица планирования экспериментов  
для трех параметров**

Номер эксперимента	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_{1,2}$	$X_{1,3}$	$X_{2,3}$	$X_{1,2,3}$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	–	+	+	–	–	+	–
3	–	–	+	–	–	+	+
4	–	–	–	+	+	+	–
5	+	+	–	+	–	–	–
6	–	+	–	–	+	–	+
7	+	–	+	–	+	–	–
8	–	+	+	–	–	+	–

Запишем базовое соотношение, т. е.  $X_1 X_2 X_3 X_4 = 1$ . Это соотношение умножим на  $X_1$  и  $X_4$  :

$$X_1^2 X_2 X_3 X_4 = X_1; \quad X_1 X_2 X_3 X_4^2 = X_4,$$

$$\text{т. е. } X_2 X_3 X_4 \equiv X_1; \quad X_1 X_2 X_3 \equiv X_4.$$

Умножив базовое соотношение на парные взаимодействия, получим:

$$X_1^2 X_2^2 X_3 X_4 = X_1 X_2; \quad X_3 X_4 \equiv X_1 X_2; \quad X_1 X_4 \equiv X_2 X_3.$$

Расчет параметров полученной модели производится аналогично неполной квадратичной модели.

$$\text{Только } b_{12} = b_{34}; \quad b_{13} = b_{24}; \quad b_{23} = b_{14}.$$

$N_{\text{д.ф.}} = 2^{4-1}$  – количество экспериментов дробного факторного плана.

### **3.4. Статистический анализ результатов активного эксперимента**

Прежде чем определять коэффициенты регрессии, необходимо выполнить статистический анализ результатов ФЭ с целью оценки их качества и пригодности для построения ММ. Статистический анализ включает оценку ошибок параллельных опытов, отсеивание грубых ошибок, проверку однородности дисперсий опытов и определение дисперсии воспроизводимости эксперимента.

#### ***3.4.1. Эксперименты с параллельными опытами***

В условиях наличия случайных помех с целью уменьшения случайных погрешностей эксперимента и повышения точности получаемой ФМ осуществляется дублирование экспериментов, т. е. проведение параллельных опытов. Каждый эксперимент, предусмотренный матрицей спектра плана, повторяется  $m = 2 \dots 5$  раз. Число  $m$  рекомендуют принимать равным для всех  $N$  точек плана. В результате проводится  $L = Nm$  опытов в соответствии с матрицей плана, предусматривающей при этом рандомизацию опытов.

Повторные опыты в одной и той же точке плана при наличии помехи дают различные результаты при определении функции отклика. Разброс результатов относительно оценки математического ожидания

функции отклика называют *ошибкой воспроизводимости эксперимента*. Эту ошибку надо оценить.

Для каждой точки плана по результатам параллельных опытов находят выборочное среднее  $\bar{y}_i$ , равное среднему арифметическому полученных опытных значений функции отклика:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m y_{iu}, \quad i = 1, N, \quad (3.45)$$

где  $u$  – номер параллельного опыта;  $y_{iu}$  – значение функции отклика в  $u$ -м параллельном опыте  $i$ -й точки спектра плана.

Для оценки отклонения функции отклика от ее среднего значения  $\bar{y}_i$  вычисляется дисперсия воспроизводимости эксперимента по данным  $m$  параллельных опытов в каждой  $i$ -й точке спектра плана:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2, \quad i = 1, N. \quad (3.46)$$

При вычислении  $S_i^2$  принимают число степеней свободы  $k$  на единицу меньше, чем число параллельных опытов, т. е.  $k = m - 1$ , так как одна степень свободы уже использована для вычисления  $\bar{y}_i$ . Это обеспечивает несмещенность оценки дисперсии воспроизводимости эксперимента  $S_i^2$ .

### 3.4.2. Отсевание грубых ошибок

Формула (3.45) справедлива лишь при нормальном распределении случайной величины  $y$ . При наличии грубых ошибок опыта распределение  $y$  отклоняется от нормального, положенного в основу регрессионного анализа. Поэтому грубые ошибки надо вначале исключить, а затем определять  $\bar{y}_i$  и  $S_i^2$ . Грубые ошибки – это брак повторных опытов. Для обнаружения брака используют  $t$ -критерий Стьюдента:

$$t_{iu} = \frac{y_{iu} - \bar{y}_i^*}{S_i^*}, \quad (3.47)$$

где  $S_i^*$  – среднее квадратическое отклонение.

Значения  $\bar{y}_i^*$  и  $S_i^*$  определяются по формулам (3.45) и (3.46), но без учета оцениваемого результата опыта  $y_{iu}$ .

Полученное значение  $t$ -критерия сравнивается с табличным  $t_T$  при выбранном уровне значимости  $q = P[t > t_{k,q}]$  и числе степеней свободы  $k$ . Уровень значимости  $q$  характеризует вероятность ошибки. Если  $t > t_T$ , то это соответствует браку данного опыта и результат его не может быть использован. В этом случае опыт подлежит повторному проведению.

### 3.4.3. Проверка однородности дисперсий

Принимается нулевая гипотеза об однородности дисперсий воспроизводимости опытов. Однородность дисперсий означает, что среди всех дисперсий  $S_i^2$  нет таких, которые бы значительно превышали все остальные. Для проверки однородности дисперсий во всех точках спектра плана используется либо критерий Кохрена  $G$ , либо критерий Фишера  $F$ . Критерий Кохрена основан на распределении отношения максимальной дисперсии  $S_{i_{\max}}^2$  к сумме всех дисперсий [1]:

$$G = \frac{S_{i_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}. \quad (3.48)$$

Критерий Кохрена применяется, если количество сравниваемых дисперсий больше двух, а число повторных опытов во всех точках плана одинаково. Определив число степеней свободы  $k_1 = m - 1$  и  $k_2 = N$  ( $N$  – число точек спектра плана,  $m$  – количество повторных опытов в каждой точке плана), находят табличное значение критерия Кохрена  $G_T$ . Если  $G < G_T$ , гипотеза об однородности дисперсий и воспроизводимости результатов принимается. Это означает, что предпосылки 1 и 2, положенные в основу регрессионного анализа, выполняются. В этом случае каждая из дисперсий  $S_{i_{\max}}^2$  оценивает одну и ту же дисперсию помехи  $\sigma_\varepsilon^2$ . Следовательно, полученные результаты эксперимента качественные и могут быть использованы для построения ММ. В противном случае следует увеличить число параллельных опытов или повторить эксперимент при строгом соблюдении методики и схемы проведения опытов, предприняв необходимые меры для исключения грубых ошибок.

Если выяснится, что непостоянство дисперсии помехи  $\sigma_\varepsilon^2$  обусловлено внутренними свойствами объекта, то необходимы более сложные способы обработки результатов эксперимента. Можно, например, вводить некоторую функцию от  $y$ :  $\ln y$ ,  $\sqrt{y}$  и др.

Критерий Фишера позволяет сравнивать две дисперсии и определяется из соотношения

$$F = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2}. \quad (3.49)$$

Дисперсии однородны, если  $F < F_T$ , где  $F_T$  – табличное значение критерия Фишера, определяемое при числах степеней свободы  $k_1$  и  $k_2$  принятом уровне значимости  $q$ .

Следует отметить, что уровень значимости  $q$  по всем критериям, применяемым в процессе статистического анализа и обработки результатов эксперимента (Кохрена, Стьюдента, Фишера), должен быть одинаков. Для технических систем рекомендуется принимать  $q = 0,05$ .

#### **3.4.4. Дисперсия воспроизводимости эксперимента**

Если дисперсии  $S_i^2$  однородны, то их усредняют и находят дисперсию воспроизводимости плана:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2. \quad (3.50)$$

Дисперсия  $S_y^2$  представляет собой оценку дисперсии помехи  $\sigma_\varepsilon^2$ . Так как число степеней свободы при определении дисперсии  $S_i^2$  равно:  $k = m - 1$ , то число степеней свободы, связанное с оценкой  $S_y^2$ , вычисляется по формуле

$$k = N(m - 1). \quad (3.51)$$

Формула (3.50) годится, если число повторных опытов во всех точках спектра плана одинаково. Если число опытов различно, используют формулу

$$S_y^2 = \frac{S_1^2 k_1 + S_2^2 k_2 + \dots + S_N^2 k_N}{k_1 + k_2 + \dots + k_N} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2 k_i}{\sum_{i=1}^N k_i}, \quad (3.52)$$

где  $k_i$  – число степеней свободы в  $i$ -й точке спектра плана;  $k_i = m_i - 1$ ;  $m_i$  – число параллельных опытов в этой точке.



### 3.5. Определение коэффициентов регрессионной модели и проверка их значимости

Параметрами регрессионной модели являются коэффициенты регрессии  $b_j$ ,  $j = 0, N_B - 1$ , где  $N_B$  – количество базисных функций. Значения коэффициентов регрессии можно получить, решив систему алгебраических уравнений (3.12). В этих уравнениях величина индекса  $d$  в обозначении базисных функций  $f_{id}$  и коэффициента регрессии  $b_d$  равна  $d = N_B - 1$ . Так как информационная матрица Фишера  $\Phi$  для ПФЭ и ДФЭ диагональная и все диагональные элементы ее одинаковы и равны  $N$ , то выражение для определения всех коэффициентов уравнения регрессии одинаково и имеет простой вид:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_j(\vec{X}_i) \bar{y}_i, \quad (3.53)$$

где  $N$  – число точек спектра плана;  $f_j(\vec{X}_i)$  – значение  $j$ -й базисной функции в  $i$ -й точке спектра плана;  $\bar{y}_i$  – выборочное среднее функции отклика в той же точке, определяемое по формуле (3.45).

Значения базисных функций  $f_j(\vec{X}_i)$  для отдельных факторов равны  $X_{ij}$ , и для взаимодействия факторов –  $X_{ik}X_{il}X_{im}\dots$ . С учетом этого на основе выражения (3.53) можно записать следующие формулы для вычисления значений коэффициентов уравнения регрессии:

– для коэффициентов при факторах  $x_j$ , включая также свободный член уравнения:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij} \bar{y}_i, \quad j = 0, N; \quad (3.54)$$

– для коэффициентов при взаимодействиях факторов:

$$b_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ik}X_{il}X_{im}\dots \bar{y}_i, \quad s = n + 1, d; \quad (3.55)$$

$$k, l, m = 1, n; \quad k \neq l \neq m,$$

где  $n$  – количество факторов.

Формулы (3.54) и (3.55) применяются для планов первого порядка. Для плана ПФЭ  $N = 2^n$ , а для ДФЭ  $N = 2^{n-p}$ . При определении коэффициента  $b_0$  (свободного члена уравнения регрессии)  $X_{i0} = 1$ ,  $i = 1, N$ .

Поскольку полученные значения коэффициентов регрессии  $b_j$ ,  $j = 0, N_B - 1$  – случайные числа, в связи с действием случайной помехи в процессе эксперимента, то они являются оценками истинных значений коэффициентов регрессии  $\beta_j$ . Погрешность определения  $b_j$  оценивают дисперсией  $S_{bj}^2$ .

Дисперсии  $S_{bj}^2$  оценок всех коэффициентов регрессии одинаковы. Величина дисперсии  $S_{bj}^2$  зависит только от ошибки воспроизводимости эксперимента  $S_y^2$  и числа опытов:

$$S_{bj}^2 = \frac{S_y^2}{Nm}, \quad (3.56)$$

где  $m$  – число повторных опытов (значение  $m$  должно быть одинаковым для всех точек  $N$  спектра плана).

После определения коэффициентов регрессии  $b_j$  проверяют их значимость. Принимается нулевая гипотеза о незначимости полученных коэффициентов и отсутствии влияния соответствующих им базисных функций на функцию отклика  $y$ . Проверка гипотезы осуществляется с использованием  $t$ -критерия Стьюдента, значение которого находят из соотношения:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{bj}}, \quad j = 0, N_B - 1, \quad (3.57)$$

где  $S_{bj}$  – среднее квадратическое отклонение погрешности оценки  $b_j$ ;  $N_B$  – общее число коэффициентов уравнения регрессии, равное количеству используемых базисных функций для построения регрессии.

Полученное значение  $t_j$  для каждого коэффициента регрессии  $b_j$  сравнивают с табличным  $t_T$ , определяемым при принятом уровне значимости  $q$  и числе степеней свободы  $k = N(m - 1)$ , с которым определялась дисперсия воспроизводимости  $S_y^2$ . Если  $t_j < t_T$ , нулевая гипотеза о незначимости коэффициента  $b_j$  принимается и член уравнения регрессии, включающий этот коэффициент, исключается из математической модели. Если же  $t_j > t_T$ , полагают, что данный коэффициент значимо (неслучайно) отличается от нуля и его следует сохранить в регрессионной модели. В этом случае значение коэффициента  $b_j$  больше ошибки

опыта, которую можно оценить величиной доверительного интервала  $\varepsilon_{bj}$ . Доверительный интервал находят по формуле

$$\varepsilon_{bj} = \pm t_T S_{bj}. \quad (3.58)$$

Следует, однако, отметить, что дисперсия воспроизводимости эксперимента  $S_y^2$  зависит от очень многих факторов: выбора центра эксперимента, интервалов варьирования факторов, наличия экстремумов функции отклика в области планирования, соотношения величины отклика и помехи (так называемое отношение сигнал–шум) и др. В этой связи при небольшом различии между  $t_j$  и  $t_T$  следует весьма осторожно относиться к оценке значимости коэффициентов регрессии. Лучше такие коэффициенты сохранить в модели, а влияние соответствующего фактора (или взаимодействия факторов) проверить в дальнейшем на более сложной модели или в иных условиях планирования эксперимента.

После исключения незначимых коэффициентов уравнение регрессии приобретает вид:

$$\bar{y} = \sum_{j=0}^{N_B^*-1} b_j f_j(\vec{X}), \quad (3.59)$$

где  $N_B^*$  – количество значимых коэффициентов регрессии.

Так как часть коэффициентов регрессии исключена из модели, то  $N_B^* < N_B \leq N$ .

Если все коэффициенты оказались значимыми, суммирование в формуле (3.59) осуществляется до  $N_B - 1$ .

### **3.6. Проверка адекватности и работоспособности регрессионной модели**

По уравнению регрессии (3.59) можно вычислить предсказанные значения функции отклика  $y$  во всех точках спектра плана:  $\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_N$ . В результате будет получено  $N$  значений  $y_i$ :  $y_1, y_2, \dots, y_N$ . Если ММ получена на основе ПФЭ и все коэффициенты регрессии признаны значимыми, то в формуле (3.59)  $N_B^* = N_B = N$ . Тогда значения  $y_i$  должны совпадать со средними выборочными значениями

ми  $\bar{y}_i$ , полученными в результате эксперимента для каждой точки спектра плана. Следовательно, поверхность отклика  $Y = \varphi(\vec{X})$  проходит через все точки  $\bar{y}_i$ ,  $i = 1, N$  и полученная модель адекватна. Значения  $y_i$  в этом случае используют для проверки правильности вычислений коэффициентов регрессии.

Если же незначимые коэффициенты  $b_j$  исключены из ММ, то  $N_B^* < N$ . Тогда  $y_i \neq \bar{y}_i$ . Это же характерно для моделей, полученных на основе ДФЭ. Разности  $(y_i - \bar{y}_i)$  несут информацию об ошибках по уравнению регрессии, и их можно использовать для последующего анализа свойств полученной модели – ее адекватности и работоспособности.

Для оценки рассеяния эмпирических значений  $\bar{y}_i$  относительно расчетных  $y_i$ , полученных по уравнению регрессии, используют дисперсию адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N - N_B^*} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (3.60)$$

где  $m$  – число параллельных опытов;  $N$  – число точек спектра плана;  $N_B^*$  – количество значимых коэффициентов регрессии.

Если число параллельных опытов в различных точках спектра плана неодинаково, то для вычисления  $S_{\text{Ад}}^2$  используют формулу

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{N - N_B^*} \sum_{i=1}^N m_i (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (3.61)$$

где  $m_i$  – число параллельных опытов в  $i$ -й точке спектра плана.

При оценке ММ принимается нулевая гипотеза о том, что полученная модель обеспечивает адекватное описание результатов эксперимента. Проверка адекватности осуществляется путем сопоставления дисперсии адекватности  $S_{\text{ад}}^2$  и дисперсии воспроизводимости эксперимента  $S_y^2$ . У адекватной модели значение  $S_{\text{ад}}^2$  обусловлено в основном действием случайной помехи, поэтому различие между  $S_{\text{ад}}^2$  и  $S_y^2$  должно быть небольшим, так как они оценивают одну и ту же дисперсию помехи  $\sigma_\varepsilon^2$ .

Проверку гипотезы об адекватности модели (гипотезы о равенстве дисперсий  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$ ) выполняют по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}. \quad (3.62)$$

В формулах (3.60) и (3.61) учтено, что чем больше число  $m$  параллельных опытов, тем с большей достоверностью оцениваются средние значения функции отклика  $y$ . Поэтому требования к различиям между экспериментальными  $\bar{y}_i$  и расчетными  $y_i$  значениями становятся более жесткими, что отражается в увеличении  $F$ -критерия.

Полученные значения статистики  $F$  сравнивают с табличным значением критерия Фишера  $F_T$ , определяемым в зависимости от уровня значимости  $q$  и чисел степеней свободы  $k_1$  и  $k_2$ , с которыми определялись дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$ :

$$k_1 = N - N_B^*; \quad (3.63)$$

$$k_2 = N(m - 1). \quad (3.64)$$

Если  $F < F_T$ , РМ считается адекватной.

Различие между дисперсиями  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$  обусловлено систематической ошибкой при определении функции отклика по уравнению регрессии из-за его приближенности. Если модель описывает физические свойства исследуемого объекта неудовлетворительно, систематическая ошибка приводит к значительному возрастанию дисперсии адекватности и, следовательно, к увеличению статистики  $F$ .

При  $F > F_T$  гипотеза адекватности модели отвергается. В таком случае нужно либо изменить структуру ММ, либо уменьшить интервалы варьирования факторов и провести повторно эксперимент с моделью прежней структуры.

В первом варианте реализуется принцип постепенного усложнения структуры ММ. Если использовалось упрощенное уравнение регрессии первого порядка, учитывающее влияние на функцию отклика только факторов или факторов и некоторого количества эффектов их взаимодействия низших порядков, что характерно для ДФЭ, то в модель можно дополнительно ввести новые члены, содержащие другие эффекты взаимодействия тех же порядков или более высоких порядков. Однако во многих случаях такой путь оказывается неэффективным, так как согласно выражению (3.60) при увеличении количества членов

уравнения регрессии и неизменном числе точек спектра плана  $N$  дисперсия адекватности может возрасти, несмотря на снижение разности  $(\bar{y}_i - y_i)$ , поскольку при этом увеличивается  $N_B$  и, следовательно, уменьшается знаменатель выражения (3.60). Кроме того, следует иметь в виду, что с увеличением порядка эффекта взаимодействия возрастает вероятность незначимости коэффициента регрессии  $b_j$  при этом эффекте. В этой связи наиболее целесообразно перейти к планированию второго порядка, используя регрессионное уравнение в виде полного квадратного полинома. После обеспечения адекватности ММ осуществляют проверку ее работоспособности.

Адекватность ММ еще не гарантирует ее пригодность к практическому использованию в задачах прогнозирования и поиска оптимальных решений. Модель может оказаться неработоспособной из-за низкой ее точности. Для проверки работоспособности модели используют коэффициент детерминации, представляющий собой числовую интегральную характеристику точности уравнения регрессии. Его значение вычисляют по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{(N - N_B^*)S_{ад}^2 + N(m-1)S_y^2}{m \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + N(m-1)S_y^2}, \quad (3.65)$$

где  $\bar{y}$  – среднее значение отклика:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i. \quad (3.66)$$

Модель считается работоспособной при  $R \geq 0,75$ . В этом случае обеспечивается уменьшение ошибки предсказания, полученного по уравнению регрессии, по крайней мере в два раза в сравнении с предсказанием по среднему значению отклика  $\bar{y}$  без учета влияния факторов  $\vec{X}$  на функцию отклика  $y$ .

**Пример 3.** После обработки экспериментов выбрали модель:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq 1}}^k b_{ij} X_i X_j + \dots + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2, \quad (3.67)$$

где  $X_i, X_j$  – значения  $i$ -го и  $j$ -го параметров режима резания;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты уравнения;  $i, j$  – номера факторов (параметров),  $i \neq j$ ;  $i, j = 1, 2, \dots, k$ , где  $k$  – число факторов.  $k = 3(t, S, V)$ .

Порядок модели для реализации эксперимента неизвестен. В этом случае применяется последовательное планирование эксперимента, т. е. используется свойство композиционности. Это свойство плана позволяет разделить эксперимент на несколько этапов и постепенно переходить от простых моделей к сложным, используя результаты предыдущих экспериментов.

На первом этапе выдвигается гипотеза о линейности модели, т. е.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i. \quad (3.68)$$

На основе данных, полученных в результате реализации экспериментов, проверяется адекватность линейной модели. Если линейная модель типа (3.68) неадекватна, то выдвигается гипотеза о значимом влиянии парных взаимодействий факторов:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq 1}}^k b_{ij} X_i X_j, \quad (3.69)$$

Вычисляются параметры данной модели и производится проверка ее адекватности. Если модель типа (3.69) неадекватна, то выполненные ранее эксперименты дополняют новой серией, позволяющей вычислить коэффициенты квадратичной модели типа (3.67).

Для упрощения обработки результатов эксперимента факторы (параметры режима резания) нормализуют по формуле

$$x'_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X_i}, \quad (3.70)$$

где  $x'_i$  – нормализованное значение фактора  $x_i$  на верхнем или нижнем уровне;  $X_i$  – действительное значение фактора;  $X_0$  – значение фактора на основном уровне;  $\Delta X_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора.

Верхний уровень нормализованного фактора равен (+1), нижний – (–1), а основной – нулю.

Число экспериментов ПФЭ составляет  $N = 2^k$ .

В рассмотренном примере  $N = 2^k = 8$ . Вычисление параметров нормализованной линейной модели типа (3.68) производится по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N Y_u; \quad (3.71)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} Y_u, \quad (3.72)$$

где  $b_i$  – параметр нормализованной модели ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ );  $k$  – число контролируемых факторов,  $u$  – номер эксперимента (или серии опытов) ( $u = 1, 2, 3, \dots, N$ );  $N$  – число экспериментов (или серии параллельных опытов);  $Y_u$  – значение функции отклика в  $u$ -м эксперименте;  $x_{iu}$  – значение  $x_i$  в  $u$ -м эксперименте.

Все параметры линейной модели определяются с одинаковой дисперсией:

$$S^2(b_i) = \frac{S_b^2}{N}, \quad (3.73)$$

где  $S_b^2$  – дисперсия воспроизводимости.

Если в каждой серии производилось по  $m$  параллельных опытов, то

$$S_b^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^m (Y_{uj} - \bar{Y}_u)^2, \quad (3.74)$$

где  $N$  – число экспериментов в плане;  $u$  – номер серии опытов;  $j$  – номер параллельного опыта в серии;  $\bar{Y}_u$  – среднее значение в  $u$ -й серии.

Если параллельные опыты отсутствуют, то для определения дисперсии воспроизводимости в центре плана проводится серия из  $m$  параллельных экспериментов.

Тогда

$$S_b^2 = \frac{1}{(m-1)} \sum_{j=1}^m (Y_{0j} - \bar{Y}_0)^2, \quad (3.75)$$

где  $Y_{0j}$  – значение функции отклика в  $j$ -м эксперименте серии ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ );  $\bar{Y}_0$  – среднее арифметическое значение для  $Y_{0j}$ .

Доверительный интервал для параметров линейной модели:

$$\Delta b_0 = \pm t_{(P,m,N)} \frac{S_b^2}{\sqrt{mN}}, \quad (3.76)$$

где  $t_{(P,m,N)}$  – значение критерия Стьюдента,  $P$  – заданный уровень достоверности значения  $b_0$ .



Для рассматриваемого случая ( $P = 0,95; mN = 4 \cdot 8 = 32$ ):

$$t_{(0,95;4,8)} = 2,04.$$

Параметр считается статистически значимым значением, если его абсолютная величина больше доверительного интервала:  $|b_i| > |\Delta b_i|$ . Статистически незначительные параметры считаем равными нулю.

В зависимости от наличия дисперсии воспроизводимости эксперимента  $S_B^2$  проверку адекватности уравнения регрессии можно производить по двум схемам. Первая из них применяется при отсутствии оценки дисперсии воспроизводимости, что характерно для пассивного эксперимента, и состоит из следующих этапов:

– вычисление дисперсии относительно среднего значения параметра оптимизации (остаточной дисперсии для уравнения нулевого порядка):

$$S_{y_0}^2 = S_{ад.0}^2 \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}; \quad (3.77)$$

– расчет дисперсии, характеризующей отклонение экспериментальных значений величин от найденных по уравнению регрессии. Если порядок уравнения заранее неизвестен, то в случае многофакторного пространства начинают с уравнения первого порядка:

$$S_{y_1}^2 = S_{ад.1}^2 \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{f}, \quad (3.78)$$

где  $y_i$  – значение параметра, вычисленное по уравнению регрессии для условия  $i$ -го опыта;  $f = N - g$  – число степеней свободы;  $g$  – число коэффициентов регрессии; для линейного уравнения  $g = k + 1$ ; для полного квадратного уравнения  $g = \frac{k(k+3)}{2} + 1$ ;  $k$  – число факторов;

– расчет отношения указанных дисперсий:

$$F_0 = \frac{S_{y_0}^2}{S_{y_1}^2}. \quad (3.79)$$

$$\text{Если} \quad F_0 \leq F_{\text{кр}}(f_1, f_2), \quad (3.80)$$

то модель неадекватна. Здесь  $f_1$  и  $f_2$  – знаменатели формул расчета  $S_{y_0}^2$  и  $S_{y_1}^2$ .

Затем вычисляют коэффициенты уравнения регрессии в виде полинома первой степени с учетом взаимодействий факторов (модель типа 3.67). Для этого уравнения определяют по формуле 3.78 значение  $S_{y_{1-2}}^2$  и вычисляют отношение

$$F_1 = \frac{S_{y_1}^2}{S_{y_{1-2}}^2}. \quad (3.81)$$

Затем проверяют соотношение (3.80). Если и принятая модель неадекватна, переходят к модели более высокого порядка (типа 3.67 и др.), процедуру повторяют до тех пор, пока не будет выполнено условие  $F_r \leq F_{\text{кр}}(f_1, f_2)$ .

Индекс  $r$  соответствует степени предпоследнего полинома.

Если известна дисперсия воспроизводимости  $S_{\text{в}}^2$  эксперимента, для оценки адекватности модели вначале рассчитывают дисперсию адекватности по формуле (3.78), а затем вычисляют опытные значения критерия  $F_p$  (вторая схема):

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{в}}^2}. \quad (3.82)$$

Если  $F_p < F_{\text{кр}}(f_1, f_2)$ , модель считается адекватной для принятой доверительной вероятности  $P$ , чисел степеней свободы дисперсии адекватности  $f_1$  и дисперсии воспроизводимости  $f_2$ . В противном случае модель неадекватна.

В рассматриваемом случае  $S_{\text{в}}^2$  известна. Число степеней свободы  $f_1$  дисперсии адекватности при  $k = 3$ :

– для модели типа (3.67):

$$f_1 = 15 - \left[ \frac{3(3+3)}{2} + 1 \right] = 5;$$

– для модели типа (3.68):

$$f_1 = 8 - 4 = 4;$$

– для модели типа (3.69):

$$f_1 = 8 - \left[ \frac{3(3+1)}{2} + 1 \right] = 1.$$

Число степеней свободы  $f_2$  для дисперсии воспроизводимости  $f_2 = 3$ .

Вычисление параметров нормализованной модели с парными и тройными взаимодействиями проводится по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N (x_0 Y)_u; \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N (x_i Y)_u; \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N (x_i x_j Y)_u, \quad i \neq j. \quad (3.83)$$

Проверка статистической значимости параметров математической модели типа (3.69) и ее адекватности производится так же, как и модели типа (3.68).

Если модели (3.68) и (3.69) неадекватны, в план проведенных экспериментов, который называется «ядром» плана, добавляется некоторое количество специальным образом расположенных точек. Добавленные, или «звездные», точки плана находятся на расстоянии «звездного» плеча  $\alpha$  от центра плана. Общее число экспериментов  $N_1$  при  $k$  факторах (в нашем случае  $k = 3$ ):

$$N_1 = N + 2k + n_0,$$

где  $N$  – число экспериментов «ядра» плана ( $N = 8$ );  $2k$  – число «звездных» точек ( $2k = 2 \cdot 3 = 6$ );  $n_0$  – число экспериментов в центре плана. В приведенном примере эксперименты на нулевом уровне повторены четыре раза, т. е.  $n_0 = 4$ .

С учетом повторения экспериментов на нулевом уровне в центре плана  $N_1 = 14 + 4 = 18$ .

Число уровней варьирования каждого фактора в данном случае равно  $-\alpha; -1; 0; +1; +\alpha$ .

«Звездное» плечо  $\alpha$  в рассматриваемом случае равно 1,215.

Ортогональность плана заключается в выборе такого количества точек факторного пространства для измеряемого отклика, которое приводит к упрощению вычисления параметров модели. В этом случае значения каждого параметра модели вычисляются независимо от значений других параметров.

Значения параметров модели типа (3.67) вычисляются по формулам:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N_1} x_{iu} Y_u}{\sum_{u=1}^{N_1} x_{iu}^2}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{N_1} (x_i x_j)_u Y_u}{\sum_{u=1}^{N_1} (x_i x_j)_u^2}, \quad (i \neq j);$$

$$b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^{N_1} (x'_i)_u Y_u}{\sum_{u=1}^{N_1} (x'_i)_u^2}; \quad b_0 = \frac{1}{N_1} \sum_{u=1}^{N_1} Y_u - \sum_{i=1}^k b_{ij} \bar{x}_i^2, \quad (3.84)$$

где  $x'_i = x_i^2 - \bar{x}_i^2$ .

В числителе формул (3.84) находятся суммы значений функции отклика и значений нормализованного фактора в соответствующем столбце, а в знаменателе – сумма квадратов значений нормализованных факторов из соответствующих столбцов.

Дисперсия оценок параметров модели определяется по формулам:

$$S_{(b_i)}^2 = \frac{S_b^2}{\sum_{u=1}^{N_1} (x_i)_u^2}; \quad S_{(b_{ij})}^2 = \frac{S_b^2}{\sum_{u=1}^{N_1} (x_i x_j)_u^2};$$

$$S_{(b_{ii})}^2 = \frac{S_b^2}{\sum_{u=1}^{N_1} (x'_i)_u^2}; \quad S_{(b_0)}^2 = \frac{1}{N} S_b^2 + \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i^2) S_{(a_u)}^2, \quad (3.85)$$

где  $S_b^2$  – дисперсия воспроизводимости, величина которой была определена по формуле (3.75).

Доверительные интервалы  $\Delta(b)$  для параметров модели в данном случае определяются при помощи критерия Стьюдента:

$$\Delta(b) = \pm t_{(P; N_1)} S_b, \quad (3.86)$$

где  $S_b$  – стационарное отклонение, рассчитанное для каждого из параметров модели по формулам (3.85).

Значение  $t_{k(P;N_1)}$  в этом случае при  $P = 0,95$  и  $N_1 = 18$  составляет 2,10.

Параметр математической модели считается статистически значимым, если соблюдается соотношение  $|b_i| > |\Delta b_i|$ .

### **3.7. Регрессионный анализ результатов эксперимента на детерминированной теоретической модели**

Детерминированная ММ характеризуется взаимно-однозначным соответствием между внешним воздействием на моделируемую систему и ее реакцией на это воздействие. Поэтому в каждой точке спектра плана проводит только один опыт. План активного ФЭ составляется в зависимости от вида ММ так же, как и для вероятностных ММ. При построении ФМ, предназначенных для решения задач оптимизации параметров ТО в процессе их функционального проектирования, используют планы первого и второго порядков.

Регрессионный анализ при экспериментах на детерминированных и вероятностных моделях включает одни и те же этапы: статистический анализ результатов эксперимента; получение коэффициентов регрессии  $b_j$ ; оценка адекватности и работоспособности ФМ. Однако содержания первого и третьего этапов в обоих случаях различны.

На первом этапе осуществляется построение модели среднего значения функции и ее статистический анализ. При этом определяют среднее значение функции отклика  $\bar{y}$  и дисперсию модели среднего  $S_y^2$ , характеризующую рассеяние результатов эксперимента относительно  $\bar{y}$  и оценивающую погрешность модели среднего:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; \quad (3.87)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.88)$$

где  $y_i$  – значение функции отклика в  $i$ -й точке спектра плана;  $N$  – количество проведенных экспериментов, равное числу точек спектра плана.

Коэффициенты регрессии первого порядка определяются по формулам (3.54) и (3.55). После определения коэффициентов  $b_j$  осуществляется проверка пригодности полученного уравнения регрессии. Для этого вначале необходимо вычислить по уравнению регрессии предсказываемые значения функции отклика в каждой точке спектра плана  $\bar{y}_i$ . В уравнение регрессии при вычислениях подставляют значения нормированных факторов  $x_{ij}$  в соответствии с матрицей спектра плана. Затем определяется остаточная дисперсия  $S_{\text{ост}}^2$ , оценивающая погрешность полученной модели:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{N - N_B} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (3.89)$$

где  $N_B$  – число коэффициентов в уравнении регрессии.

Качество предсказания, обеспечиваемого полученной моделью, оценивают по критерию Фишера  $F$  и коэффициенту детерминации  $R^2$ .

При определении критерия Фишера принимается иная нулевая гипотеза, чем при экспериментах на вероятностных моделях. Здесь нулевая гипотеза гласит о том, что модель среднего  $\bar{y}(\bar{X})$  достаточно хорошо описывает исследуемый процесс. Регрессионная модель окажется адекватной, если выдвинутая гипотеза будет опровергнута.

По критерию Фишера, сравнивают дисперсии оцениваемой и противопоставляемой моделей. Последняя должна быть более точной, чем оцениваемая модель. Поэтому в данном случае критерий Фишера равен отношению дисперсии модели среднего  $S_y^2$  к остаточной дисперсии  $S_{\text{ост}}^2$ :

$$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2}. \quad (3.90)$$

Уравнение регрессии адекватно описывает результаты эксперимента, если полученное по формуле (3.90) значение  $F$  больше табличного значения критерия Фишера  $F_T$ , определяемого при принятом уровне значимости  $q$  и числах степеней свободы  $k_1$  и  $k_2$ , с которыми определены дисперсии  $S_y^2$  и  $S_{\text{ост}}^2$ . Согласно выражениям (3.88) и (3.89)  $k_1 = N - 1$ ;  $k_2 = N - N_B$ . Если условие  $F > F_T$  выполняется, это означает, что уравнение регрессии описывает результаты эксперимента в  $F_T$  раз лучше модели среднего. Тогда нулевая гипотеза отвергается и регрессионная модель адекватна.

Критерий детерминации определяется по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{(N - N_B)S_{\text{ост}}^2}{(N - 1)S_y^2}. \quad (3.91)$$

Значение  $R^2$  определяет долю рассеяния экспериментальных значений функции отклика, учитываемую регрессионной зависимостью. Модель считается работоспособной, если  $R^2 > 0,75$ .

При использовании квадратичных ММ оценку значимости коэффициентов обычно не производят и модель не упрощают, а используют полный квадратный полином со всеми его составляющими (свободным членом, линейными эффектами, эффектами парных взаимодействий и квадратичными членами).

Упрощению подвергаются лишь линейные многофакторные регрессии, полученные на основе ПФЭ. Принимается нулевая гипотеза о том, что  $b_j = 0$ ,  $j = 1, N_B$ , и осуществляется проверка, отличаются ли статистически значимо оценки коэффициентов  $b_j$  от нуля. Значимость  $b_j$  проверяют по критерию Стьюдента, используя формулу (3.57). При вычислении дисперсии  $S_{bj}^2$ , оценивающей погрешности определения коэффициентов  $b_j$ , используется остаточная дисперсия  $S_{\text{ост}}^2$  (а не дисперсия воспроизводимости эксперимента  $S_y^2$ , как это было для вероятностной модели):

$$S_{bj}^2 = \frac{S_{\text{ост}}^2}{N}. \quad (3.92)$$

При уменьшении числа коэффициентов регрессии  $N_B$ , по формуле (4.89), остаточная дисперсия возрастает, что приводит к снижению критерия Фишера. Поэтому члены уравнения регрессии с незначимыми коэффициентами  $b_j$  можно исключать лишь в том случае, если проверка полученной упрощенной модели на адекватность, по критерию Фишера, дает положительный результат.

### **3.8. Получение математической модели на основе пассивного эксперимента**

При проведении экспериментов на реальных ТО независимое варьирование факторов в большинстве случаев оказывается невозможным, поэтому для получения их ММ обычно проводятся пассивные

эксперименты. Объекты при этом находятся в нормальных условиях функционирования, а изменение их фазовых координат и выходных параметров обусловлено влиянием внешних возмущающих воздействий, носящих случайный характер. В этой связи фазовые координаты и выходные параметры представляют собой случайные процессы. На них могут влиять изменения внутренних параметров объектов (например, параметров системы управления). Отнесем к факторам пассивного эксперимента  $x_i, i = 1, n$  внешние воздействия, наблюдаемые фазовые координаты и изменяемые внутренние параметры, а к функциям отклика  $y_j, j = 1, m$  – выходные параметры объекта (показатели качества и эффективности).

Для получения информации о физических свойствах объекта, необходимой при построении ММ, выбирают некоторый интервал дискретизации независимой переменной (времени  $t$ ) и фиксируют в дискретные моменты времени значения факторов и функций отклика. Эти значения представляют собой случайные последовательности чисел, составляющие непрерывные множества. Необходимо, чтобы эти случайные числа для каждого фактора и каждой функции отклика в отдельности были некоррелированными. Это достигается соответствующим выбором интервала дискретизации времени. Эксперимент должен проводиться таким образом, чтобы исследуемые случайные процессы были стационарными и эргодическими. Допускается лишь нестационарность по математическому ожиданию, которую можно легко отфильтровать и использовать центрированные значения случайных процессов.

Используя полученные выборки факторов и функций отклика, находят их статистические оценки и осуществляют построение РМ ТО:  $y_j = \varphi(\vec{X}, \vec{b}), j = 1, m$ . При этом необходимо проверить выполнение 1 и 5-го постулатов регрессионного анализа. Согласно 1-му постулату все выборки должны иметь нормальные распределения (проверяется по критерию Пирсона). Затем проверяется выполнение 5-го постулата о некоррелированности столбцов матрицы факторов. Для этого осуществляется корреляционный анализ результатов статистических испытаний.

В процессе корреляционного анализа определяют оценки коэффициентов парной корреляции  $r_{y_j x_i}$  между выбранными для построения ММ выходными параметрами  $y_j$  и факторами  $x_i$ , а также между парами факторов  $x_i$  и  $x_k$ , т. е. оценки коррелированности этих факторов  $r_{x_i x_k}$ .



Оценка коэффициента корреляции между  $y_j$  и  $x_i$  вычисляется по формуле

$$r_{y_i x_i} = \frac{1}{(N-1)S_{y_i} S_{x_i}} \left( \sum_{u=1}^N y_{ju} x_{iu} - N \bar{y}_j \bar{x}_i \right), \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}, \quad (3.93)$$

где  $N$  – число проведенных опытов;  $y_{ju}$ ,  $x_{iu}$  – значения переменных  $y_j$  и  $x_i$  в  $u$ -м опыте;  $\bar{y}_j$ ,  $\bar{x}_i$  – оценки математических ожиданий (выборочные средние), соответственно, функции отклика  $y_j$  и фактора  $x_i$ ;  $S_{y_j}$ ,  $S_{x_i}$  – средние квадратические отклонения.

Коэффициенты  $r_{y_j x_i}$  являются элементами корреляционной матрицы  $\vec{R}_j = (r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jn})$   $i = 1, n; j = 1, m$ , в которой  $r_{ji} = r_{y_j x_i}$ :

$$R_{\vec{Y}\vec{X}} = \begin{bmatrix} \vec{R}_1 \\ \vec{R}_2 \\ \dots \\ \vec{R}_j \\ \dots \\ \vec{R}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{j1} & r_{j2} & \dots & r_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}, \quad (3.94)$$

где  $R_{\vec{Y}\vec{X}} = (r_{ji})$  – вектор-строка оценок коэффициентов парной корреляции между выходным параметром  $y_j$  и всеми факторами  $x_i$ ,  $i = 1, n$ .

Аналогично вычисляются оценки коэффициентов парной корреляции  $r_{x_i x_k}$  между факторами  $x_i$  и  $x_k$ :

$$r_{x_i x_k} = \frac{1}{(N-1)S_{x_i} S_{x_k}} \left( \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ku} - N \bar{x}_i \bar{x}_k \right), \quad i, k = \overline{1, n}. \quad (3.95)$$

Обозначим  $r_{x_i x_k} = \rho_{ik}$ . Тогда связь между факторами можно представить корреляционной матрицей

$$R_{\vec{X}} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \dots & \rho_{nn} \end{bmatrix}. \quad (3.96)$$

В матрице (3.96)  $\rho_{ii} = 1$ ,  $i = 1, n$ , а остальные коэффициенты корреляции могут принимать значения в пределах  $0 \leq |\rho_{ik}| \leq 1$ . Если  $|\rho_{ik}|$  близко к 1, это свидетельствует о сильной коррелированности факторов  $x_i$  и  $x_k$ , а при  $|\rho_{ik}| = 1$  эти факторы функционально (не вероятно-стно) связаны между собой. Оценка влияния каждого из них на функцию отклика по уравнению регрессии окажется невозможной. В случае сильной корреляции факторов  $x_i$  и  $x_k$  один из них следует исключить. Для построения уравнения регрессии  $y_j = \varphi(\vec{X}, \vec{b})$  оставляют тот фактор, у которого коэффициент корреляции  $r_{y_j x_i}$  больше.

Регрессионный анализ результатов пассивного эксперимента выполняется по той же методике, что и активного. Факторы нормируют с использованием формул (3.18)–(3.20). Но в пассивном эксперименте значения факторов – случайные числа, поэтому после нормирования каждый из них во всей серии опытов распределяется в диапазоне  $-1 < x_i < +1$ . В результате матрица Фишера не диагональная, как в активном эксперименте, а может иметь все ненулевые элементы. Поэтому определение коэффициентов регрессии  $b_j$  требует формирования и решения системы алгебраических уравнений (3.12).

Оценка качества предсказания, обеспечиваемого полученной моделью, осуществляется по критерию Фишера  $F$  и по коэффициенту детерминации  $R^2$ , вычисляемых, соответственно, по формулам (3.93) и (3.94).

Если необходимо получить линейное уравнение регрессии в виде (3.21), можно использовать корреляционные матрицы (3.94) и (3.96).

Используя вектор-строку  $\vec{R}_j$  матрицы (3.94) для  $j$ -го выходного параметра  $y_j$  и корреляционную матрицу (3.96), составим матричное уравнение:

$$R_{\vec{X}} \vec{H}_j = \vec{R}_j, \quad j = 1, m. \quad (3.97)$$

Решив систему линейных алгебраических уравнений (3.97) относительно неизвестного вектора  $\vec{H}_j = (h_{ji})$ ,  $i = 1, n$ , вычислим искомые коэффициенты уравнения регрессии (3.21) по формуле

$$b_{ji} = \frac{h_{ji} S_{yj}}{S_{xi}}. \quad (3.98)$$

Если факторы  $x_i$  – независимые случайные величины, то матрица  $R_{\vec{X}}$  единичная, т. е.  $\rho_{ii} = 1$ ,  $\rho_{ik} = 0$ ,  $i \neq k$ . Тогда  $h_{ji} = r_{ji}$ .

Изложенную методику можно также использовать при решении задач прогнозирования параметров ТО. На основе ретроспективного анализа составляют матрицы важнейших внутренних и выходных параметров объектов данного типа. Такой анализ аналогичен проведению пассивного эксперимента. Сущность эксперимента в данном случае состоит в создании множества конструкций одного и того же целевого назначения. Собранные информация об объекте представляет собой статистические выборки – конечные наборы значений реализаций случайных величин (факторов и функций отклика). Регрессионная модель, полученная в результате такого эксперимента, позволяет осуществлять поиск оптимальных решений и прогнозирование. При этом допускается экстраполяция параметров с выходом за пределы факторного пространства.

### **3.9. Порядок проведения экспериментов при оптимизации параметров**

#### **3.9.1. Однопараметрическая оптимизация**

1. Выбирается функция оптимизации.
2. Выбирается параметр оптимизации.
3. Из предварительных экспериментов находят предельные значения параметра.
4. Рассчитывается среднее значение параметра.
5. Находят приращение параметра.
6. Затем по расчетным значениям параметра экспериментально определяются функции.
7. Сравниваются полученные значения и определяется оптимальное, для которого соответствует оптимальное значение параметра.

**Пример 4.** Необходимо найти оптимальное значение глубины резания, при которых температура ( $T$ ) минимальна.

1. Выбираем вид функции оптимизации по справочным данным:

$$T = C_T t^{x_i}.$$

В этом случае численные значения параметров определяют методом деления отрезка пополам.

Из предварительных экспериментов находим предельные значения параметров  $t_{\min}$ ,  $t_{\max}$  (рис. 3.4).

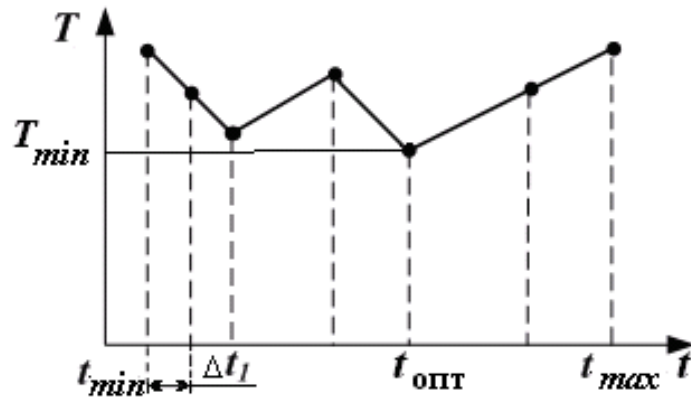


Рис. 3.4. График изменения параметра

2. Рассчитываем среднее значение:

$$t_{cp} = \frac{(t_{min} + t_{max})}{2}.$$

3. Находим приращение аргумента:

$$\Delta t = \frac{(t_{cp} - t_{min})}{4}.$$

4. Затем по расчетным значениям глубины резания экспериментально определяется температура в зоне резания:

$$t_1 = t_{min} \rightarrow T_1;$$

$$t_2 = t_1 + \Delta t \rightarrow T_2;$$

$$t_3 = t_{cp} - \Delta t \rightarrow T_3.$$

5. Сравниваются полученные значения температуры. Если  $T_1 > T_2 > T_3$ , то минимум располагается в интервале от  $t_{cp} \dots t_{max}$ .

Следующий цикл экспериментов:

$$\Delta t_1 = \frac{(t_{max} - t_{cp})}{4};$$

$$\left. \begin{aligned} t_4 &= t_{cp} + \Delta t_1 \rightarrow T_4 \\ t_5 &= t_{max} - \Delta t_1 \rightarrow T_5 \\ t_6 &= t_{cp} \rightarrow T_6 \\ t_7 &= t_{max} \rightarrow T_7 \end{aligned} \right\}.$$

Находят характер изменения температуры в выделенном интервале. Если численное значение в предыдущем интервале меньше, чем в рассматриваемом, то оптимальное значение глубины находят путем проведения дополнительных экспериментов в предыдущем интервале.

Вторая серия экспериментов:

6. Интервал  $t_{\min} \dots t_{\text{cp}}$ .

$$7. t_{\text{cp}2} = \frac{(t_{\min} + t_{\text{cp}})}{2}.$$

$$8. \Delta t_2 = \frac{(t_{\text{cp}2} - t_{\min})}{4}.$$

Для выделенного интервала производится серия экспериментов по п. 4.

Цикл экспериментов повторяется до выполнения условия

$$T_i < T_{i-1}; \quad T_i - T_{i-1} \leq \varepsilon.$$

Если условия выполняются, то  $t_i$  соответствует оптимальному значению глубины.

### 3.9.2. Многопараметрическая оптимизация

Рассмотрим на примере двухпараметрической оптимизации.

Примем в качестве функции оптимизации температуру, а в качестве параметров  $\nu$  и  $S$ , т. е.  $T = f(\nu, S)$ , которая графически представлена на рис. 3.5.

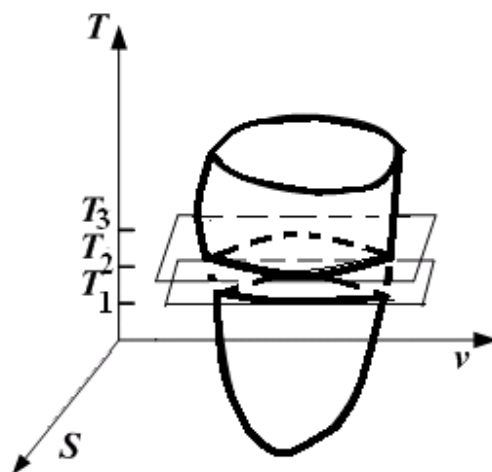


Рис. 3.5. Эскиз предполагаемой функции оптимизации

Выполнив сечение поверхности плоскостями, можно получить области оптимизации в осях параметров.

Наибольшее распространение получили: метод сеток, наискорейшего спуска (подъема) и прогнозируемого шага. Рассмотрим эти методы более детально.

### 3.9.2.1. Метод сеток

Из предварительных экспериментов находят минимальные и максимальные значения параметров и рассчитывают интервалы изменения параметров, например, скорости резания и подачи:

$$\Delta \vartheta = \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min}}{n_{\vartheta}}; \quad \Delta S = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{n_s}.$$

Затем рассчитывают численные значения параметров.

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \vartheta_{\min}; & \vartheta_2 &= \vartheta_1 + \Delta \vartheta; & \vartheta_3 &= \vartheta_2 + \Delta \vartheta \dots; \\ S_1 &= S_{\min}; & S_2 &= S_1 + \Delta S; & S_3 &= S_2 + \Delta S \dots \end{aligned}$$

Каждая угловая точка соответствует отдельному эксперименту (рис. 3.6).

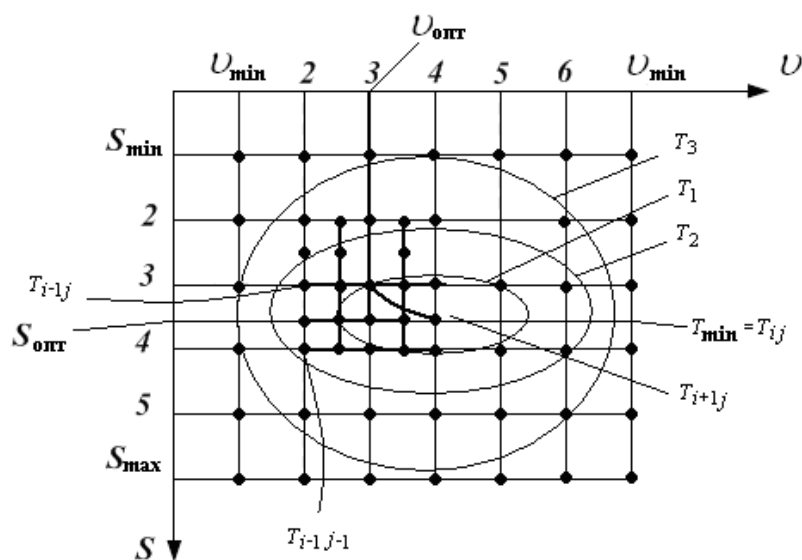


Рис. 3.6. Сечения функции оптимизации

Сравнивая полученные в результате экспериментов численные значения функции, определяют ее минимальное значение.

Затем рассчитывают приращения функции в точках расположенных вблизи минимального значения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_1 &= T_{i-1,j-1} - T_{i,j} \\ \Delta T_2 &= T_{i-1,j} - T_{i,j} \end{aligned} \right\}$$

Из этих приращений находят минимальное. Если все приращения больше допускаемой погрешности, то полученный интервал разбивают сеткой с шагом в два раза меньше исходного.

Образовавшиеся узлы соответствуют дополнительным экспериментам. Проводят дополнительные эксперименты и определяют дополнительные разности температур.

Затем оценивают выполнение условия:

$$T_{i,j} < T'_{i,j}; \quad \Delta T'_{i,j} = T'_{i,j} - T_{i,j} \leq [\varepsilon_T]. \quad (3.99)$$

Если полученная разность меньше допустимой погрешности (3.99), то численные значения параметров в этой точке  $T_{i,j}$  являются оптимальными.

### 3.9.2.2. Метод наискорейшего спуска (подъема)

Примем в качестве функции оптимизации температуру, а в качестве параметров  $\vartheta$  и  $S$ , т. е.

$$T = f(\vartheta, S).$$

Из предварительных экспериментов находят минимальные и максимальные значения параметров и рассчитывают интервалы изменения параметров.

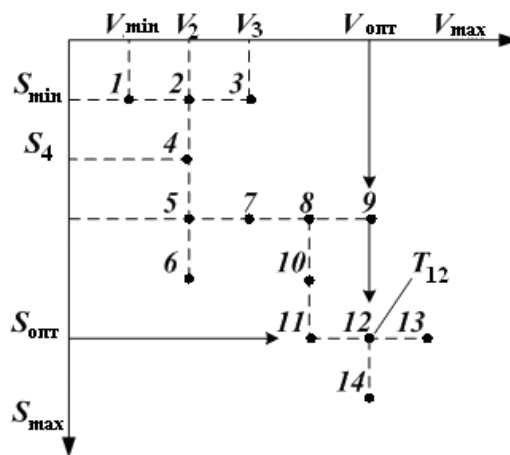


Рис. 3.7. Схема выбора параметров эксперимента

Эксперименты проводят по этапам (рис. 3.7). На первом этапе в первом эксперименте используют минимальные значения параметров. Проводят эксперимент и измеряют температуру:

$$1) \left. \begin{array}{l} \vartheta_1 = \vartheta_{\min} \\ S_1 = S_{\min} \end{array} \right\} T_1.$$

С учетом приращения первого параметра проводят второй эксперимент:

$$2) \left. \begin{array}{l} \vartheta_2 = \vartheta_1 + \Delta\vartheta \\ S_2 = S_1 \end{array} \right\} T_2,$$

если  $T_2 < T_1$ , то проводят третий эксперимент, в котором продолжают изменять первый параметр при постоянном втором:

$$3) \left. \begin{array}{l} \vartheta_3 = \vartheta_2 + \Delta\vartheta \\ S_3 = S_1 \end{array} \right\} T_3,$$

если  $T_3 > T_2$ , то параметры второго эксперимента выбирают в качестве базовых для новой серии экспериментов, в которой изменяют второй параметр.

Тогда условия четвертого эксперимента:

$$4) \left. \begin{array}{l} \vartheta_4 = \vartheta_2 \\ S_4 = S_2 + \Delta S \end{array} \right\} T_4,$$

если  $T_4 < T_2$ , то проводят пятый эксперимент:

$$5) \left. \begin{array}{l} \vartheta_5 = \vartheta_2 \\ S_5 = S_4 + \Delta S \end{array} \right\} T_5,$$

если  $T_5 < T_4$ , то проводим шестой и все последующие эксперименты: 6...14.

Если, например,  $T_{12} < T_{13}$  и  $T_{12} < T_{14}$ ,  $\left. \begin{array}{l} \Delta T = T_{13} - T_{12} \leq [\varepsilon_T] \\ \Delta T = T_{14} - T_{12} \leq [\varepsilon_T] \end{array} \right\}$ , тогда

значения скорости и подачи в условиях двенадцатого эксперимента являются оптимальными.

Если же данные условия не выполняются, то необходимо уменьшить интервал изменения параметров в два раза и продолжить эксперименты.

### 3.9.2.3. Метод прогнозируемого шага

По аналогии примем в качестве функции оптимизации температуру, а в качестве параметров  $v$  и  $S$ , т. е.

$$T = f(\vartheta, S).$$

Из предварительных экспериментов находят минимальные и максимальные значения параметров и рассчитывают интервалы изменения параметров.



Эксперименты проводят по этапам (рис. 3.8). На первом этапе принимают минимальные значения параметров в качестве базовых. Проводят серию экспериментов и измеряют температуру:

$$1) \left. \begin{array}{l} \vartheta_1 = \vartheta_{\min} \\ S_1 = S_{\min} \end{array} \right\} T_1.$$

Все последующие эксперименты производят для последовательного приращения параметров из принятых базовых точек:

$$2) \left. \begin{array}{l} \vartheta_2 = \vartheta_1 + \Delta\vartheta \\ S_2 = S_1 \end{array} \right\} T_2;$$

$$3) \left. \begin{array}{l} \vartheta_3 = \vartheta_1 \\ S_3 = S_1 + \Delta S \end{array} \right\} T_3.$$

Определяют разности полученных значений:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta T_1 = T_3 - T_1 \\ \Delta T_2 = T_2 - T_1 \end{array} \right\}$$

Выбирают минимальную разность, параметры которой принимают за базовые для новой серии экспериментов.

Например, второй эксперимент базовый, тогда на его основе проводят два эксперимента по пп. 2 и 3.

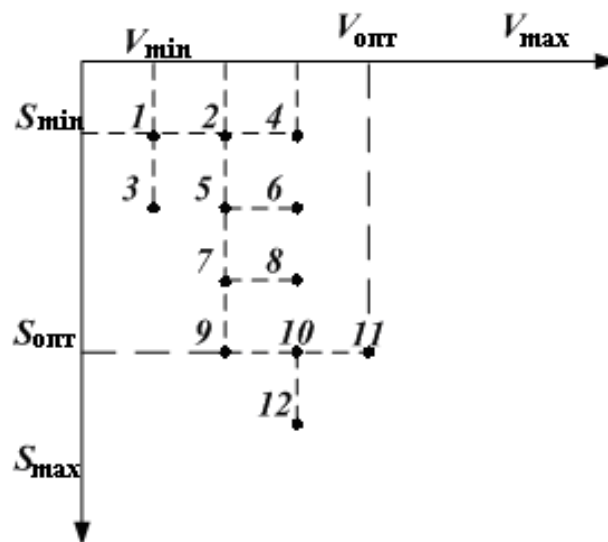


Рис. 3.8. Схема выбора параметров эксперимента

Такие серии экспериментов проводят до тех пор, пока не получат, что  $\Delta T \leq [\varepsilon_T]$ , тогда, например, параметры десятого эксперимента будут иметь оптимальные значения.

## 4. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 4.1. Методика исследования контактных площадей опорных поверхностей

Контурные площади касания базовых граней пластин можно исследовать по методике тонких окрашивающих покрытий (как наиболее простой и достаточно точной). При этом используется контрольный образец, плоскость которого (эталонная) напыляется окрашивающим веществом.

В качестве образца используется пластина зеркального стекла, эталонными плоскостями в которой служили ее шлифованные и полированные грани. При соприкосновении обезжиренной поверхности пластины с эталонной плоскостью образца, покрытой угольной пленкой, образовывается четкий затемненный отпечаток контурной площади касания, который можно сфотографировать, а площадь его измерить. Для упрощения анализа контурных площадей касания и сопоставления результатов необходимо использовать понятие относительной контурной площади касания, т. е.

$$S_{ij} = \frac{S'_{ij}}{S_{ni}},$$

где  $S_{ij}$  и  $S'_{ij}$  – соответственно, относительная и действительная контурные площади касания  $i$ -й грани  $j$ -пластины;  $S_{ni}$  – номинальная площадь  $i$ -й грани.

Например, кривые распределения относительной контурной площади касания опорной грани твердосплавных пластин, построенные по полученным данным, представлены на рис. 4.1. При сравнении эмпирических и теоретических распределений параметров по критерию Пирсона все графики согласуются с теоретическими кривыми нормального распределения с вероятностью согласия 0,05. Из сравнения средних значений по критериям Стьюдента и Романовского, характеризующих различные партии, можно заключить, что партии пластин II и III не имеют больших различий, а партия I существенно отличается от остальных, что указывает на низкое качество изготовления пластин партии I.

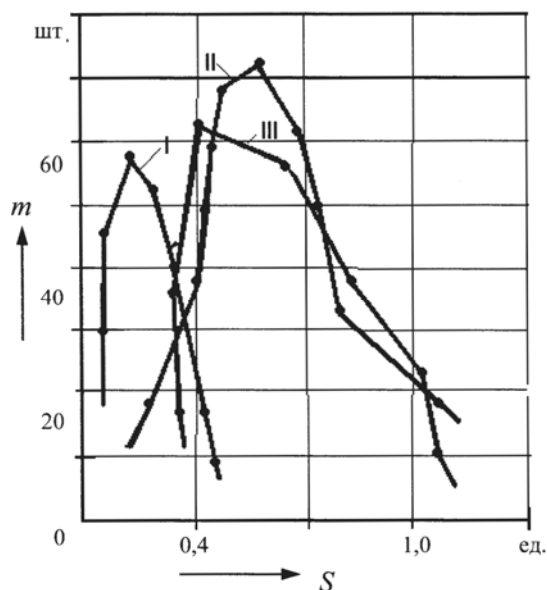


Рис. 4.1. Графики распределения относительных площадей

Для более полного анализа контурных площадей касания граней пластин необходимо построить аналитические формы площадей касания с заданной вероятностью. На рис. 4.2, *a–и* представлены такие площади для твердосплавных пластин. При построении этих форм номинальная площадь разбивалась на элементарные площадки в  $1 \text{ мм}^2$ . Каждая элементарная площадка обрабатывалась статистически, т. е. определялись средние значения, среднеквадратическое отклонение и строились гистограммы распределений. По полученным гистограммам определялись элементарные площадки, имеющие контакт с заданной вероятностью [3].

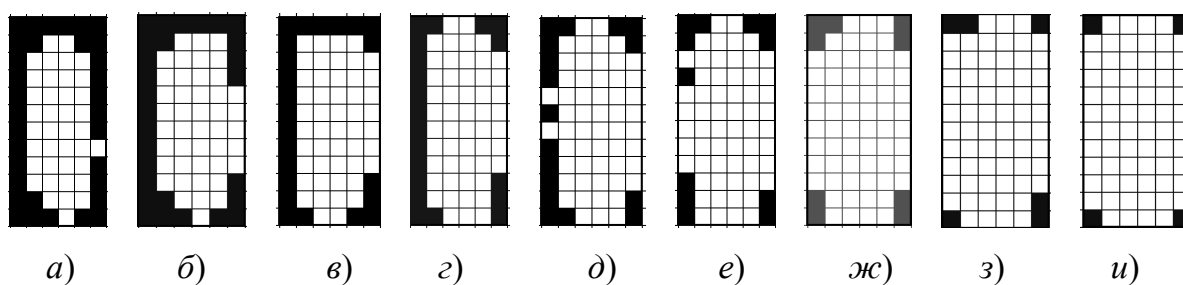


Рис. 4.2. Формы расчетных контурных площадей касания с вероятностями:

*a* – 0,1; *б* – 0,2; *в* – 0,3; *г* – 0,4; *д* – 0,5; *е* – 0,6; *ж* – 0,7; *з* – 0,8; *и* – 0,9

Задаваясь вероятностями, определялись номера площадок, имеющих контакт, по которым формировалась контурная площадь касания с заданной вероятностью.

Для более полной информации о площадях касания необходимо произвести измерения отклонения поверхностей от плоскости (рис. 4.3). Наиболее точные измерения получаются при выборе в качестве базы самой опорной поверхности; при выборе других поверхностей в качестве базовых необходимо произвести оценку их взаимного расположения.

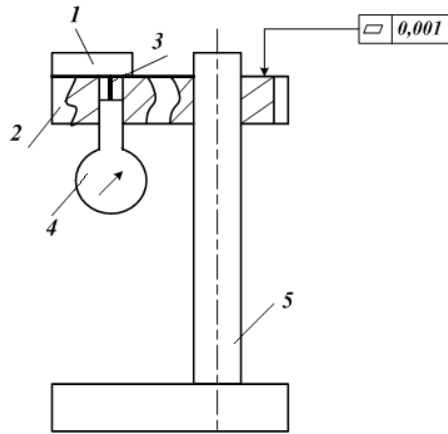


Рис. 4.3. Эскиз приспособления:

1 – измеряемая пластина; 2 – контрольная плита;  
3 – игла; 4 – измерительная головка; 5 – стойка

Вначале производится настройка измерительной головки. Для этого на контрольную поверхность устройства вместо измеряемой пластины 1 устанавливают плоскопараллельную меру длины (рис. 4.3). Измерительную иглу головки 4 устанавливают с натягом, что обеспечивает отсчет измерений и в «+», и в «-». Контрольную площадку разделяют на удельные площадки (рис. 4.4, а). В пределах выделенных площадок производят измерения. Для каждой площадки строится гистограмма (рис. 4.4, б).

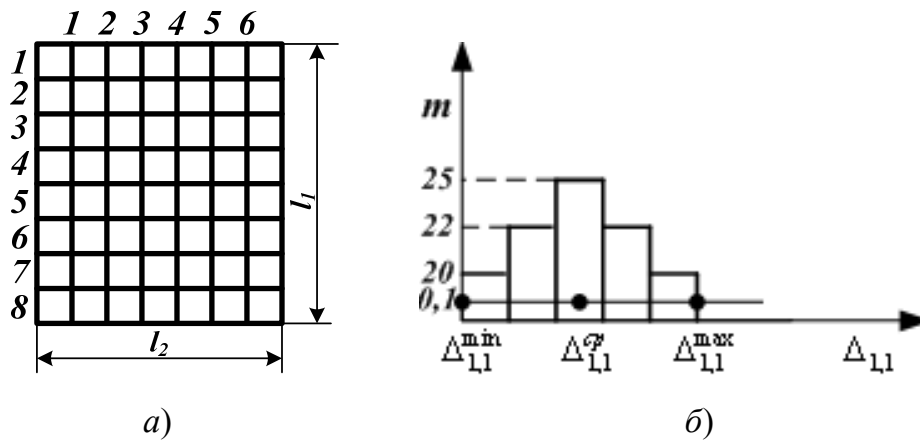


Рис. 4.4. Схема к построению виртуальных площадей касания:  
а – контрольная площадка; б – гистограмма удельной площадки

Затем определяются вероятностные значения отклонений от плоскостности. Для этого задается требуемая вероятность, по которой определяется расчетная частота:

$$P_i = \frac{n}{m_i}; \quad m_i = Pn,$$

где  $P_i, P$  – расчетная и заданная вероятности;  $n$  – количество исследуемых объектов;  $m_i$  – расчетное значение частоты с заданной вероятностью.

С учетом заданной вероятности по гистограмме определяют значения отклонения от плоскости (рис. 4.4, б).

Построенные численные значения заносят в таблицу (рис. 4.4, а). По полученным табличным значениям строится топография исследуемых поверхностей.

## 4.2. Методика исследования контактной жесткости

*Описание исследовательского стенда.* Стенд состоит из специального устройства и нагружающей системы (рис. 4.5) [3]. Устройство на испытательном стенде располагается под углом  $\beta$ , соответствует углу равнодействующей силы резания (рис. 4.5, а). Нагружающая система состоит из нагружающего винта 1, шаровых опор 2 и 4, динамометра 3 и экспериментального устройства 5 (рис. 4.5, б).

*Тарирование устройства.* Пластина 1 снимается с устройства и каждая игла сверху перемещается микроскопическим винтом, а снизу полученное перемещение регистрируется тензодатчиком 6, наклеенном на ш-образной пластине 5 (рис. 4.6). Кроме того, эти перемещения фиксируются измерительной головкой. Сигнал от каждого тензодатчика поступает через усилитель и цифровой осциллограф на компьютер. По полученным данным строятся кривые (6 кривых по количеству пластин) (рис. 4.7).

Затем устройство нагружается (рис. 4.5, б) либо механически, либо на гидроустановке.

По результатам нагружения строятся графики (рис. 4.8).

Достоинство: представленный стенд позволяет определить характер контактных перемещений.

Недостатки: 1) нарушение реального контакта в зоне измерения; 2) дискретность измерения; 3) измерения производятся на специальном устройстве.

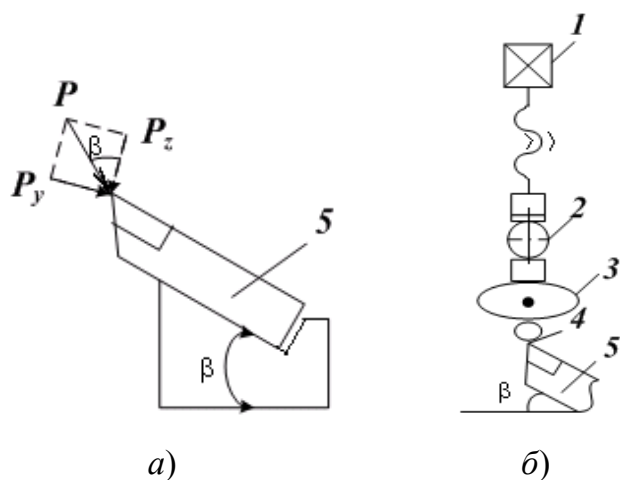


Рис. 4.5. Схема стенда:  
*a* – специальное устройство; *б* – нагружающая система

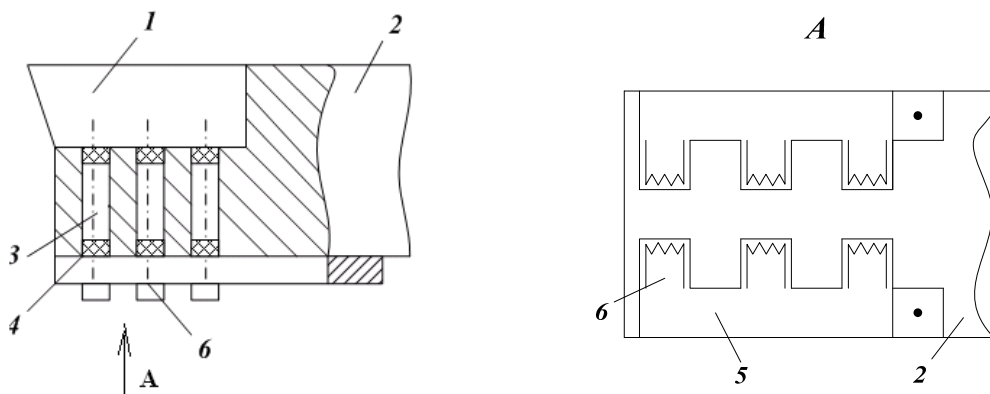


Рис. 4.6. Эскиз экспериментального устройства:  
*1* – пластина; *2* – державка; *3* – измерительные иглы; *4* – втулки;  
*5* – ш-образные пластины; *6* – тензодатчики

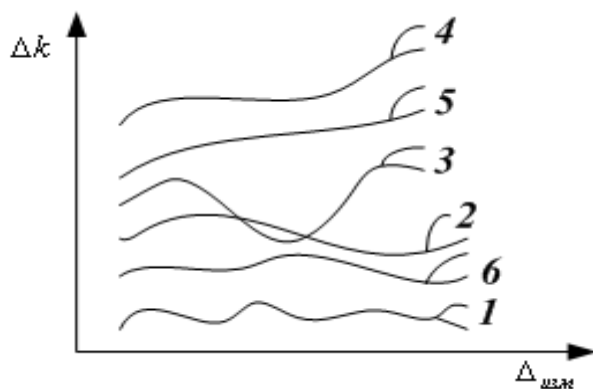


Рис. 4.7. Тарировочные графики

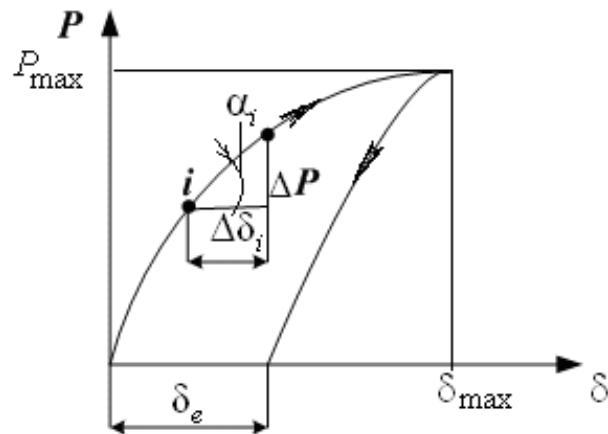


Рис. 4.8. График статической точности

По полученным графикам можно определить средний коэффициент жесткости:

$$k_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{max}}}{\delta_{\text{max}}}$$

и текущее значение коэффициента жесткости:

$$k_i = \frac{\Delta P_i}{\Delta \delta_i}$$

### 4.3. Методика исследования статической точности сборного резца оптическими измерениями

Выбираются три точки – II–IV – на максимальном расстоянии друг от друга (рис. 4.9) [3].

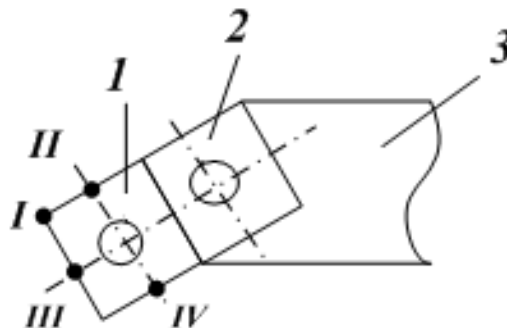


Рис. 4.9. Схема измерения перемещений:  
1 – пластина; 2 – клин; 3 – державка

Через каждую выделенную точку II–IV проходят лучи от лазеров 4 (рис. 4.10), часть которых попадает на светочувствительный элемент 5, а от него через усилитель, цифровой осциллограф и на ЭВМ.

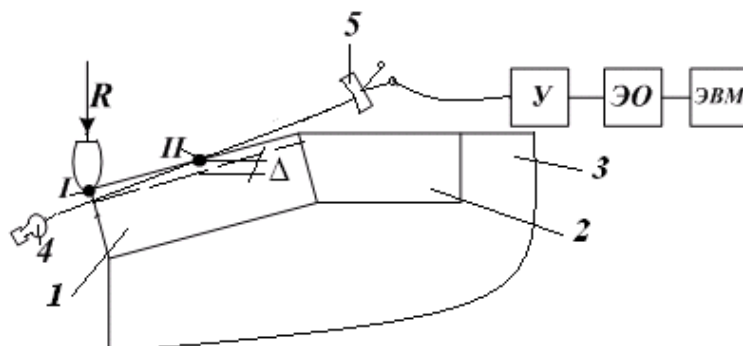


Рис. 4.10. Схема регистрации перемещений:  
4 – лазер; 5 – светочувствительный элемент

*Тарирование установки.* Нож 1 перемещается микрометрическим винтом 2, и эти перемещения фиксируются измерительной головкой 3. В результате перемещения ножа 1 уменьшается световой поток на светочувствительный элемент 4 (рис. 4.11). По результатам измерений строятся графики (рис. 4.12).

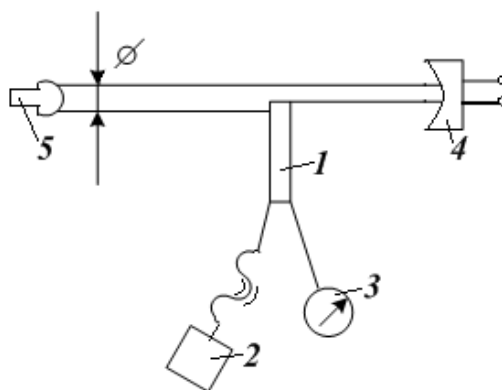


Рис. 4.11. Схема тарирования

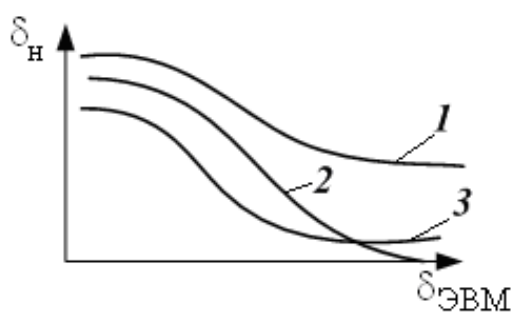


Рис. 4.12. Тарировочные графики



Затем определяется статическая точность инструмента.

Статический угол поворота пластины находим с использованием уравнения прилегающей плоскости к базовой поверхности:

$$\begin{vmatrix} X - X_1 & Y - Y_1 & Z - Z_1 \\ X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_2 & Y_3 - Y_2 & Z_3 - Z_2 \end{vmatrix} = 0, \quad (4.1)$$

где  $\left. \begin{matrix} X_1 \dots X_3 \\ Y_1 \dots Y_3 \end{matrix} \right\}$  координаты выделенных точек измерения.

Раскрыв определитель (4.1):

$$\begin{aligned} & (X - X_1)((Y_2 - Y_1)(Z_3 - Z_1) - (Y_3 - Y_1)(Z_2 - Z_1)) - (Y - Y_1) \times \\ & \times ((X_2 - X_1)(Z_3 - Z_1) - (X_3 - X_1)(Z_2 - Z_1)) + (Z - Z_1) \times \\ & \times ((X_2 - X_1)(Y_3 - Y_1) - (X_3 - X_1)(Y_2 - Y_1)) = 0 \end{aligned}$$

и обозначив:

$$\begin{aligned} & ((Y_2 - Y_1)(Z_3 - Z_1) - (Y_3 - Y_1)(Z_2 - Z_1)) = A; \\ & ((X_2 - X_1)(Z_3 - Z_1) - (X_3 - X_1)(Z_2 - Z_1)) = B; \\ & (((X_2 - X_1)(Y_3 - Y_1) - (X_3 - X_1)(Y_2 - Y_1)) = C, \end{aligned}$$

получим:

$$AX - AX_1 - BY + BY_1 + CZ - CZ_1 = 0.$$

С учетом обозначения  $D = -AX_1 + BY_1 - CZ_1$  получим:

$$AX - BY + CZ + D = 0. \quad (4.2)$$

Затем производится нагружение вершины пластины и новые значения координат подставляются в уравнение (4.1):

$$\begin{vmatrix} X - X'_1 & Y - Y'_1 & Z - Z'_1 \\ X'_2 - X'_1 & Y'_3 - Y'_1 & Z'_1 - Z'_1 \\ X'_3 - X'_2 & Y'_3 - Y'_2 & Z'_3 - Z'_2 \end{vmatrix} = 0.$$

После соответствующих преобразований получим:

$$A'X - B'Y + C'Z + D' = 0,$$

затем определяется угол наклона пластины:

$$\cos \varphi = \frac{AA' + BB' + CC'}{\sqrt{AA'^2 + BB'^2 + CC'^2}}$$

#### 4.4. Методика исследования точности позиционирования стола станка

Экспериментальная установка содержит две измерительные системы, состоящие из источников света – лазеров 3, 8 и светочувствительных элементов – 6, 7 (рис. 4.13).

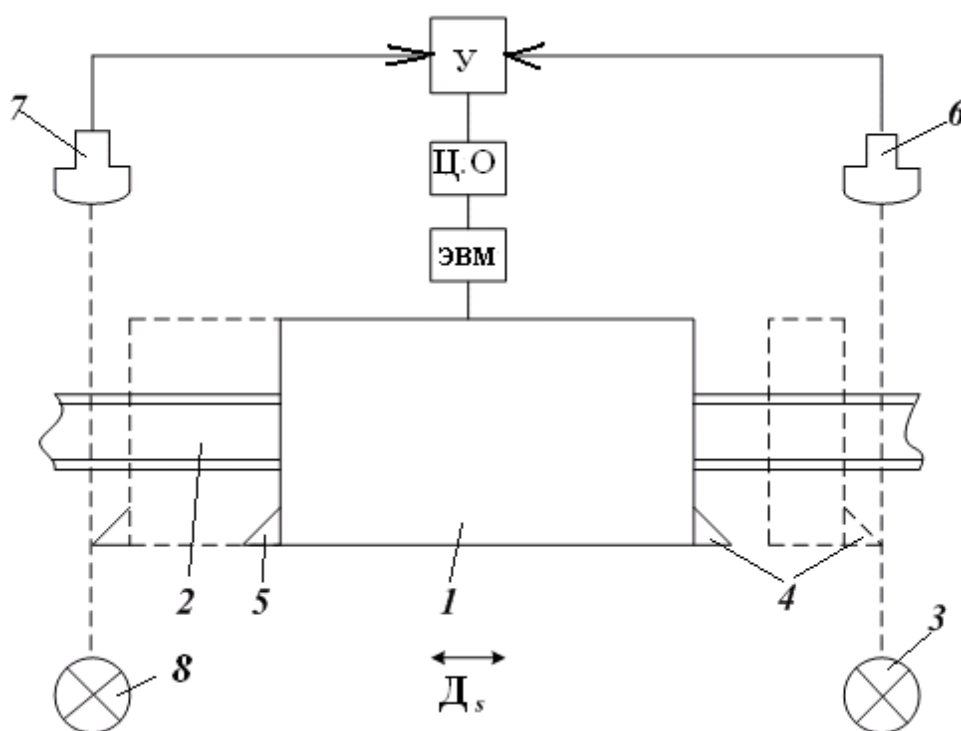


Рис. 4.13. Схема экспериментальной установки:  
1 – стол станка; 2 – станина с направляющими; 4, 5 – ножи

Затем программируется величина перемещения стола. Стол перемещается на программируемую величину, а погрешность фиксируется датчиками 6, 7, сигнал от которых передается через усилитель и цифровой осциллограф на ЭВМ.

По результатам измерений строится гистограмма точности позиционирования.

## 4.5. Методика исследования передачи «винт-гайка»

### 4.5.1. Исследование кинематической погрешности

Для проведения исследований используется экспериментальная установка (рис. 4.14).

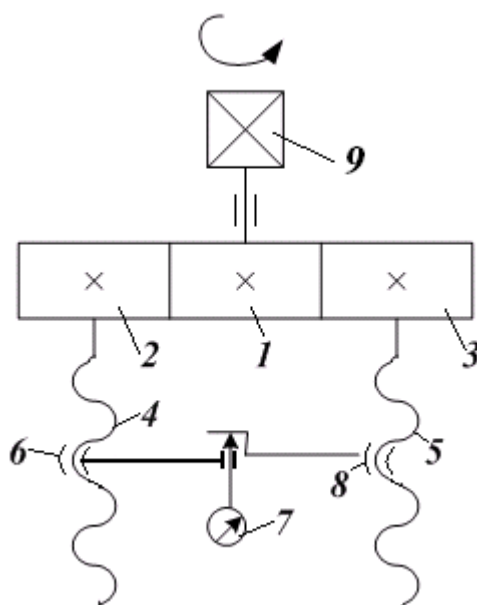


Рис. 4.14. Схема измерительной установки:

1–3 – прецизионные зубчатые передачи; 4 – эталонный винт;  
6 – эталонная гайка; 5, 8 – исследуемая передача винт-гайка;  
7 – устройство измерения; 9 – рукоятка

При вращении рукоятки 9 вращаются зубчатые колеса 1–3, винты 4, 5 и перемещаются гайки 6, 8, погрешность относительных перемещений которых фиксирует измерительная головка 7.

По полученным данным строится график изменения кинематической погрешности вдоль винта (рис. 4.15).

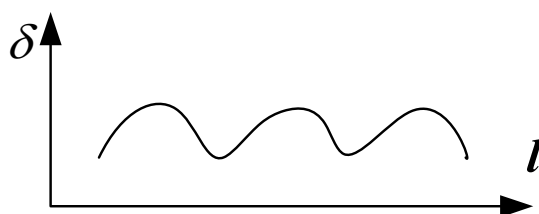


Рис. 4.15. График изменения кинематической погрешности

#### 4.5.2. Исследование статической точности передачи «винт–гайка» скольжения

Нагружающее устройство состоит из гаек 2, 7, между которыми расположены тарельчатые пружины 3 (рис. 4.16, а) [4]. Усилие в передаче создается гайками 5 и 6 через втулку 4. Таким образом, одна сторона винта и гайки резьбы находятся в контакте, а вторая – разгружена. С разгруженной стороны на профиле резьбы выполнено углубление, в котором наклеивают тензодатчик 3 (рис. 4.16, б). Провода от датчика проходят через центральный канал 4.

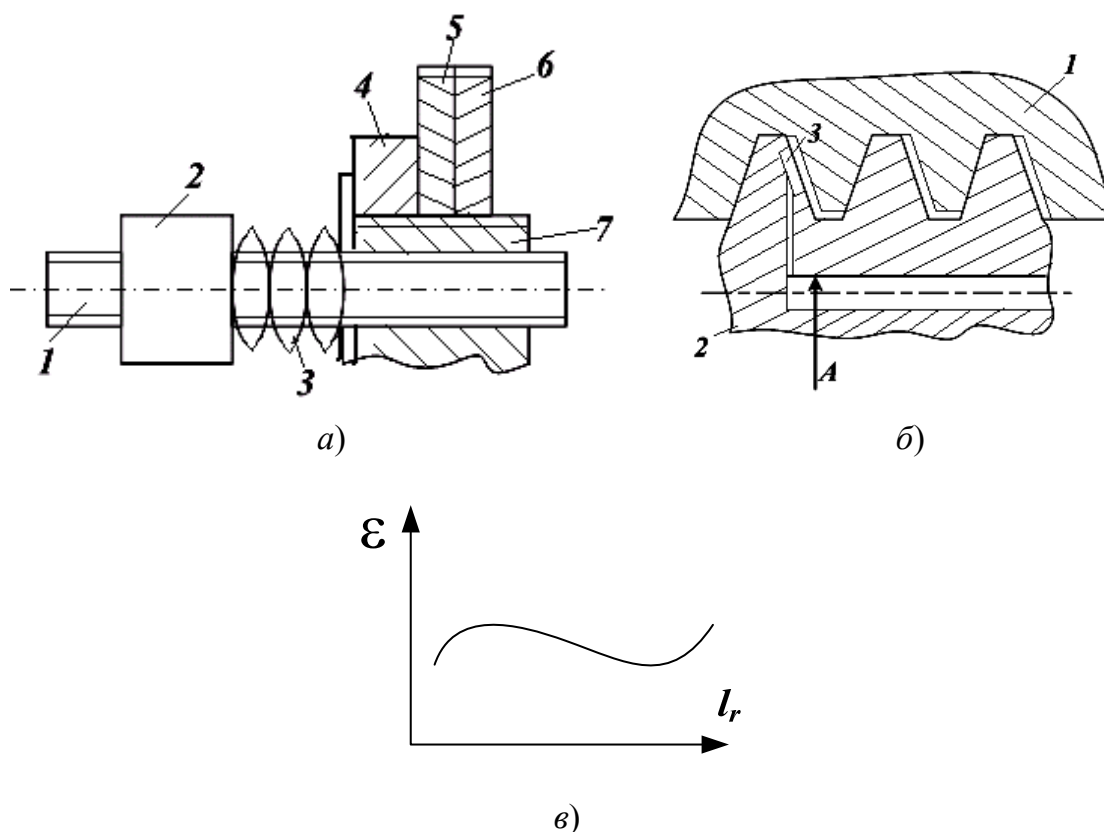


Рис. 4.16. Нагружающее устройство с результатами измерения:  
а – эскиз нагружающего устройства; б – эскиз зоны измерения;  
в – график изменения деформации

При вращении винта можно определить контактные деформации, оценить внутреннее напряжение в витках гайки. По полученным сигналам от тензодатчика строится график изменения деформации по длине гайки (рис. 4.16, в).

Изменяя усилие в передаче гайками 5, 6 (рис. 4.16, а), можно определить влияние усилия на деформации в передаче (рис. 4.17).

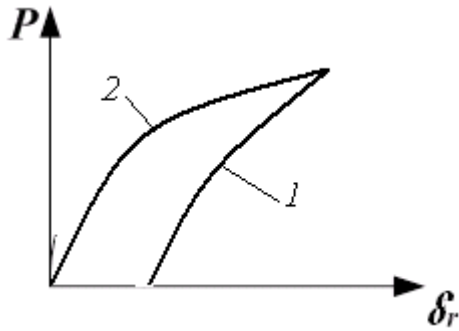


Рис. 4.17. График влияния усилия на деформации в передаче

Кривая 1 позволяет оценить статическую точность передачи.

### 4.5.3. Исследование передачи «винт–гайка» качения

Для проведения исследований используется экспериментальная установка (рис. 4.18) [4].

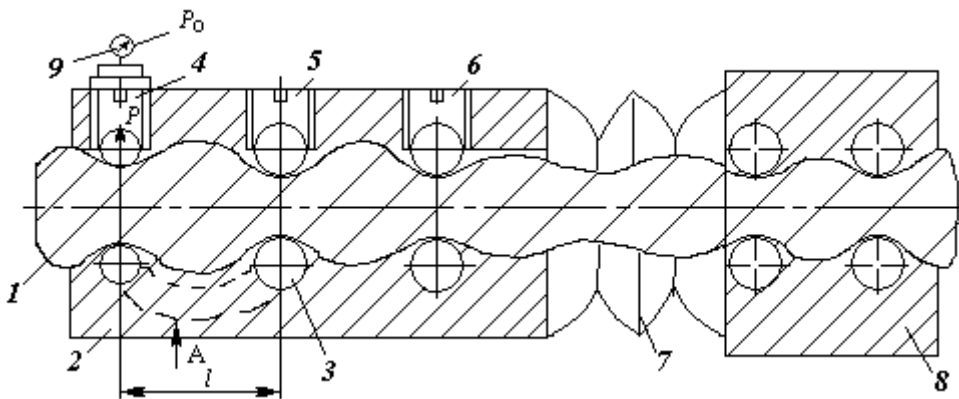


Рис. 4.18. Схема нагружающего устройства:  
1 – винт; 2 – гайка; 3 – шарики; 4–6 – заглушки

Соседние витки резьбы гайки имеют каналы возврата шариков. Между гайкой 2 и гайкой 8 устанавливается пакет тарельчатых пружин – 7.

Гайкой 8 регулируется осевая сила, т. е. натяг в передаче.

Вместо заглушек 4–6 устанавливают манометры с гидроцилиндрами 9.

В результате измерений удельных давлений шарика на шток цилиндра строят график изменения давления в каждом витке по длине гайки 1 (рис. 4.19).

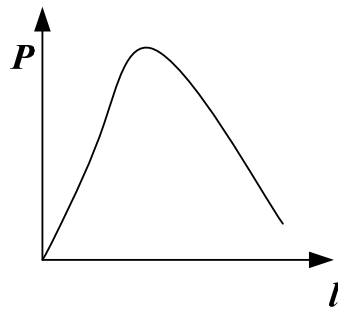


Рис. 4.19. График удельных давлений

Чтобы определить влияние внутренних усилий передачи «винт–гайка» на момент, прикладываемый на винте, используют специальный стенд (рис. 4.20).

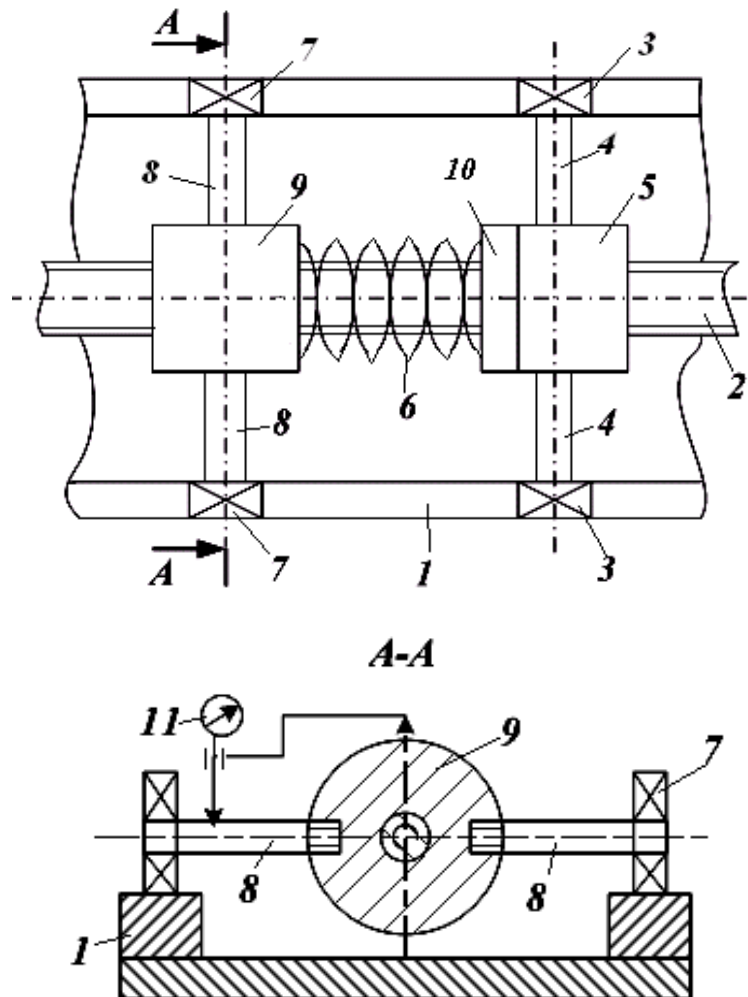


Рис. 4.20. Эскиз экспериментального стенда:  
 1 – основание с направляющими; 2 – винт; 3, 7 – подшипники;  
 4, 8 – оси; 6 – пакет тарельчатых пружин; 5, 9, 10 – гайки;  
 11 – измерительная головка

Для создания осевого усилия в передаче используется пакет тарельчатых пружин 6 и регулировочная гайка 10, накрученная на гайку 5.

К винту 2 прикладывают крутящий момент, который обеспечивает перемещение гаек 5, 9.

Момент трения, который возникает в гайках, регистрируется приборами: измерительной головкой 11 или с помощью тензодатчиков, которые наклеиваются на оси 4 и 8.

Установленные приборы позволяют определить перемещения осей 8. Для перевода перемещений в крутящие моменты производят тарирование установки. При этом динамометрическим ключом создают усилие в гайках и регистрируют прибором.

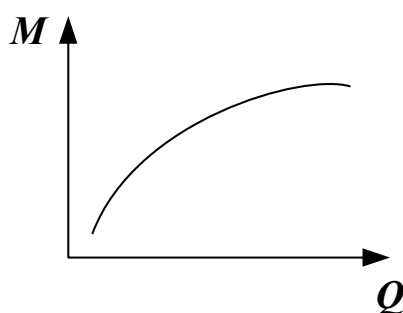


Рис. 4.21. График влияния внутренних усилий передачи «винт–гайка» на момент, прикладываемый на винте

В результате экспериментов строится график зависимости момента от усилия в передаче  $Q$  (рис. 4.21):  $M = f(Q)$ .

#### 4.5.4. Методика определения КПД передачи «винт–гайка»

Коэффициент полезного действия передачи определяют на специальном стенде (рис. 4.22).

Крутящий момент на винте создается с помощью грузов 6.

Тогда КПД определится как:

$$\eta = \frac{A_n}{A_3} = \frac{QS}{M\psi} = \frac{QS}{GD\psi} = \frac{CQ}{G}.$$

Как известно, на КПД передачи «винт–гайка» оказывает влияние материал винта и гайки, способ обработки, угол подъема витков винтовой.

Известно, что

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \rho)},$$

где  $\alpha$  – угол подъема витков резьбы;  $\rho$  – угол трения передачи.

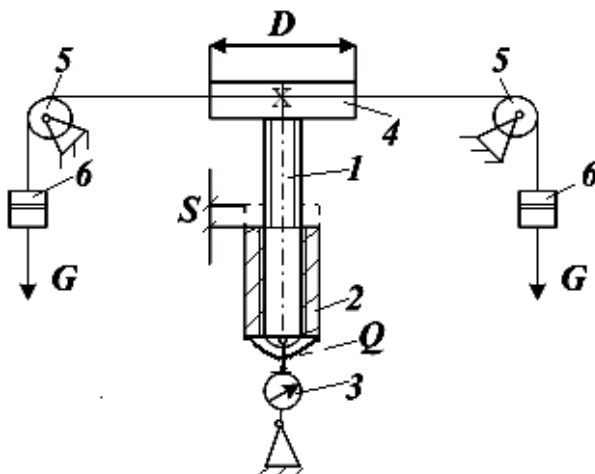


Рис. 4.22. Эскиз экспериментальной установки:  
1 – винт; 2 – гайка; 3 – динамометр; 4 – диск; 5 – блоки; 6 – грузы

Чтобы полученные результаты согласовались с теоретическими данными, необходимо определить точность, с которой будут измерены грузы  $G$ , усилия  $Q$  и угол подъема  $\alpha$ .

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P}{\pi d_2},$$

где  $d_2$  – средний диаметр резьбы;  $P$  – шаг.

Эта зависимость требует правильного выбора средств измерения шага и среднего диаметра.

#### 4.5.5. Оценка погрешности экспериментов

Оценка погрешности производится при решении прямой или обратной задач.

При прямой задаче выбираются имеющиеся средства измерения, затем выводятся уравнения погрешности (относительной и абсолютной), по которым рассчитывается погрешность исследуемой функции. Если она превышает допускаемый предел, то необходимо определить чувствительность каждого параметра на функцию и, найдя наибольшую чувствительность, изменить выбранный прибор для измерения этого параметра.



При реализации обратной задачи выбирается допустимая погрешность принятой функции и по относительной и абсолютной погрешности рассчитываются допустимые погрешности средств измерения каждого параметра. По результатам расчетов выбирается необходимое средство измерения.

Допустим, что измеряем функцию  $f(x)$ :

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – параметры, которые влияют на функцию.

Тогда, чтобы найти абсолютную погрешность, рассчитывают:

$$\xi(f(x)) = \frac{\partial f(x)}{\partial(x_1)} dx_1 + \frac{\partial f(x)}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} dx_n,$$

где  $\frac{\partial f(x)}{\partial(x_1)}$ ,  $\frac{\partial f(x)}{\partial x_2}$ ,  $\frac{\partial f(x)}{\partial x_n}$  – чувствительность параметров;  $dx_1$ ,  $dx_2$ ,  $dx_n$  – погрешность измерения каждого параметра.

Относительная погрешность:

$$\delta(f(x)) = d(\ln f(x)).$$

Оценим влияние погрешности измерений на точность измерения угла трения:

$$\rho = \arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\eta} - \alpha.$$

Для этого рассчитаем относительную и абсолютную погрешности. Относительная погрешность равна:

$$\begin{aligned} \xi_\rho &= \frac{\partial(\arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\eta} - \alpha)}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial(\arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\eta} - \alpha)}{\partial \eta} d\eta; \\ \xi_\rho &= \left[ \frac{1}{(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{\eta^2})} \frac{1}{\cos^2 \alpha \eta} - 1 \right] d\alpha + \frac{1}{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{\eta^2}} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\eta^2} d\eta = \\ &= \left( \frac{\eta}{(\eta^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha) \cos^2 \alpha} - 1 \right) \xi_\alpha + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\eta^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \xi_\eta. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Абсолютная погрешность:

$$\delta_p = d(\ln(\arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\eta} - \alpha)) = \frac{1}{\arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\eta} - \alpha} \frac{\eta^2}{\eta^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \frac{\xi_\alpha \eta - \operatorname{tg} \alpha \cdot \xi_\eta}{\cos^2 \alpha \cdot \eta^2} - \xi_\alpha. \quad (4.4)$$

Уравнения (4.3) и (4.4) позволяют определить чувствительность каждого параметра, но так как  $\alpha$  и  $\eta$  сами являются функциями от отдельных параметров, то можно найти их абсолютную и относительную погрешности, которые должны входить в уравнения (4.3) и (4.4).

$$\alpha = \arctg \frac{P}{\pi d_2}; \quad \eta = \frac{CQ}{G};$$

$$\xi_\alpha = \frac{\partial(\arctg \frac{P}{\pi d_2})}{\partial P} dP + \frac{\partial(\arctg \frac{P}{\pi d_2})}{\partial d_2} d(d_2) = \frac{\pi}{\pi^2 d_2^2 + P^2} (d_2 \varepsilon_p + P \varepsilon_{d_2});$$

$$\delta_\alpha = d(\ln \arctg(\frac{P}{\pi d_2})) = \pm \frac{1}{(\arctg \frac{P}{\pi d_2})} \frac{dP \cdot \pi d_2 - \pi d(d_2)P}{\pi^2 d_2^2 (1 + \frac{P^2}{\pi^2 d_2^2})};$$

$$\xi_\eta = \frac{\partial(C \frac{Q}{G})}{\partial Q} dQ + \frac{\partial(C \frac{Q}{G})}{\partial G} dG = \frac{C}{G} \xi_{Q} - \frac{CQ}{G^2} \xi_G; \quad (4.5)$$

$$\xi_Q \rightarrow dQ;$$

$$\xi_G \rightarrow dG;$$

$$\delta_\eta = d(\ln \frac{CQ}{G}) = \frac{G}{CQ} \frac{CG \xi_Q - CQ \xi_G}{G^2}. \quad (4.6)$$

Таким образом, для оценки погрешности угла трения необходимо вначале определить относительную и абсолютную погрешности угла  $\alpha$  и КПД  $\eta$ , а затем подставить их в выражение для расчета погрешности угла трения.

Если полученное значение выходит за допускаемые пределы, то вначале необходимо выбрать точность измерения среднего диаметра, а затем средства измерения шага, силы и веса.

## 4.6. Методика исследования виброустойчивости оборудования

### 4.6.1. Средства измерения параметров динамической системы станков

Структурная схема измерения параметров динамической системы (ДС) станка включает (рис. 4.23) измерительный преобразователь ИП, усилитель У, регистрирующий измерительный прибор РИ и блок питания БП [5]. Преобразователь (датчик) предназначен для образования измерительного сигнала, т. е. он преобразует неэлектрические параметры (длину, механические напряжения, температуру и др.) в электрические (напряжение, ток и др.). Первые характеризуют воздействие на ИП и называются входными параметрами, вторые – результат воздействия и называются выходными параметрами.

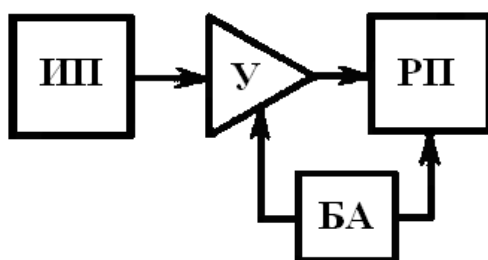


Рис. 4.23. Структурная схема измерения параметров ДС станка

Одной из основных характеристик преобразователя является чувствительность:

$$S = \frac{H}{N} = \frac{\Delta \ell}{\delta_p}, \text{ или } S = \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.7)$$

где  $H$  – изменение выходного параметра;  $N$  – изменение входного параметра;  $\alpha$  – угол наклона касательной к кривой чувствительности.

Преобразователь высокой чувствительности, как правило, имеет малый рабочий диапазон измерения и наоборот (рис. 4.25, б).

К числу важных технических характеристик преобразователей относятся также диапазон рабочих частот, температур и чувствительность к различным помехам: электрическим и магнитным полям, механическим напряжениям, акустическим шумам и т. п. При использовании нестандартных преобразователей во избежание ошибок, характеристики необходимо проверять самостоятельно.

В экспериментальных исследованиях ДС станков преимущественное распространение получили преобразователи двух групп, работающие по принципу: I) электрического сопротивления и II) электрического генератора.

У преобразователей группы I неэлектрическое воздействие  $N$  (рис. 4.24, а) вызывает изменение электрического сопротивления  $R$ . Вследствие этого изменяется ток  $I$  в электрической цепи, питаемой стабилизированным источником напряжения  $E$ . Изменение тока регистрирует прибором мА.

Преобразователи второй группы непосредственно преобразуют неэлектрическое воздействие  $N$  в электрическое напряжение  $E$  (рис. 4.24, б). Специальный источник электрической энергии отсутствует. Изменение напряжения регистрируется прибором мВ.

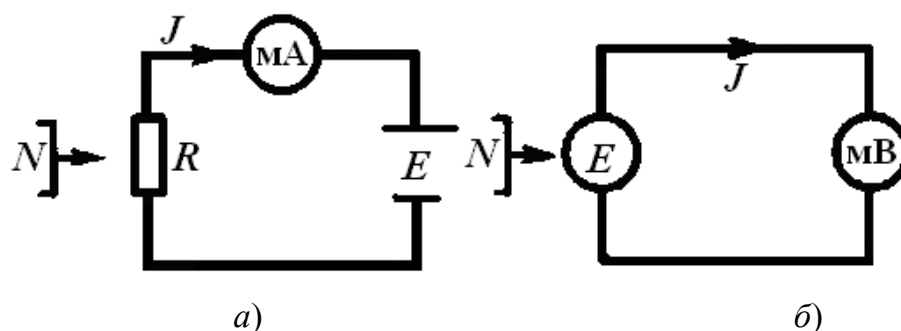


Рис. 4.24. Принципиальные схемы работы преобразователей:  
а – группа электрического сопротивления;  
б – группа электрического генератора

*Устройство и основные характеристики преобразователей группы I.* Представителями преобразователей этой группы являются проволочные, реже фольговые тензопреобразователи. Они представляют собой плоские элементы  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 4.25, а), состоящие из двух склеенных слоев тонкой бумаги и петлеобразно расположенной между ними проволоки диаметром 15–30 мкм. Наклеенные на какую-либо нагружаемую деталь преобразователи деформируются вместе с металлом. Изменяется поперечное сечение, длина и удельное сопротивление проволоки, а следовательно, и ее первоначальное сопротивление  $R$  на величину  $\Delta R$ :

$$\Delta R = RS_0\varepsilon, \text{ или } S_0 = \frac{\Delta R}{R\varepsilon}, \quad (4.8)$$

где  $S_0$  – относительная чувствительность материала проволоки;  $\varepsilon$  – относительное изменение длины проволоки.

Изменение сопротивления тензопреобразователя и ток в измерительной цепи пропорциональны напряжению металла в местах наклепки. Поэтому с его помощью можно измерять силы, перемещения, давления, ускорения и т. д.

Акселерометром (рис. 4.25, а) с помощью тензопреобразователей  $R_1$ ,  $R_2$  можно измерять вертикальное ускорение  $\ddot{y}$  детали. Сила инерции  $F = m\ddot{y}$  изгибает пружину 2 и вызывает напряжение  $\sigma$ , пропорциональное массе  $m$  и ускорению:  $\sigma \equiv F \equiv \ddot{y}$ .

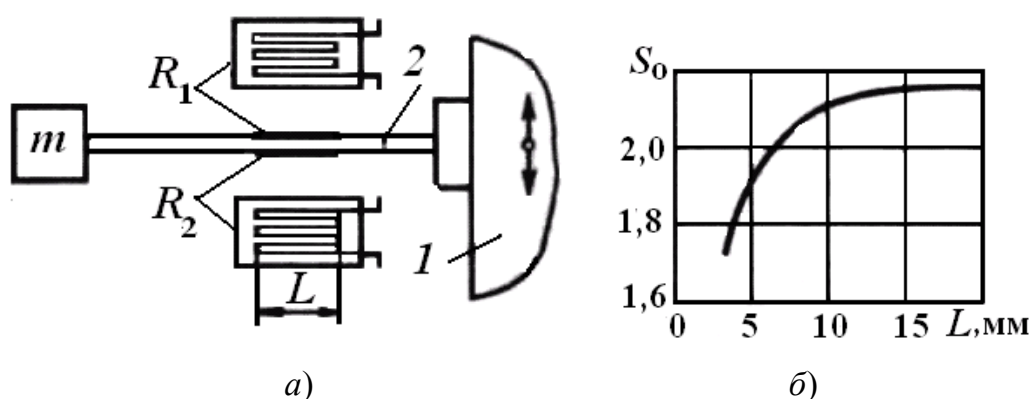


Рис. 4.25. Проволочный тензопреобразователь: а – схема акселерометра; б – график изменения чувствительности тензопреобразователя  $S_0$

Тензопреобразователи различают по величине сопротивления  $R$  и базы  $\ell$ . Относительная чувствительность повышается с увеличением базы до 15 мм (рис. 4.25, б). Рекомендуется выбирать  $\ell = 5 \dots 20$  мм.

Для заданного материала величина  $S_0$  практически постоянна. Благодаря этому можно исключить непосредственную тарировку тензометрического устройства, используя формулу (4.8) и зависимость  $\sigma$  от модуля упругости  $E$ :

$$\sigma = \varepsilon E = E \frac{\Delta R}{RS_0}.$$

Все шире применяют полупроводниковые преобразователи, в том числе тензорезисторы, у которых при деформации изменяется удельное сопротивление. Их относительная чувствительность в десятки раз выше, чем проволочных.

Для измерения малых перемещений бесконтактным методом применяются индуктивные преобразователи. Принцип их работы состоит в изменении сопротивления магнитопровода с изменением воз-

душного зазора магнитной цепи или магнитной проницаемости железного сердечника, входящего в магнитную цепь.

Индуктивность  $L$  электромагнитной системы, содержащей обмотку и ферромагнитный сердечник с небольшим воздушным зазором  $\delta$ , зависит от числа витков  $\omega$ , активного магнитного сопротивления сердечника  $R_{ж}$ , магнитного сопротивления воздушного зазора  $R_{\delta}$  и реактивной составляющей магнитного сопротивления  $x_M$ , обусловленной вихревыми токами и потерями на гистерезис:

$$L = \frac{\omega^2}{\sqrt{(R_{ж} + R_{\delta})^2 + x_M^2}}.$$

Все эти параметры могут быть положены в основу построения различных индуктивных преобразователей.

Конструкция бесконтактного индуктивного преобразователя с ферритным сердечником для исследования колебаний столов, суппортов и вращающихся шпинделей приведена на рис. 4.26, а.

Сопротивление магнитопровода изменяется с изменением зазора  $\delta$  между ферритовым сердечником 2 и колеблющейся деталью 1, которая выполняет роль якоря. Катушка 3 имеет 400 витков из проволоки ПЭЛ-0,1 мм. Чувствительность преобразователя в комплекте с усилителем и осциллографом: в статике  $S = 10 \dots 20$  мм/мкм; на частоте исследуемого процесса 100 Гц;  $S = 7 \dots 14$  мм/мкм (для схемы включения по рис. 4.27, а).

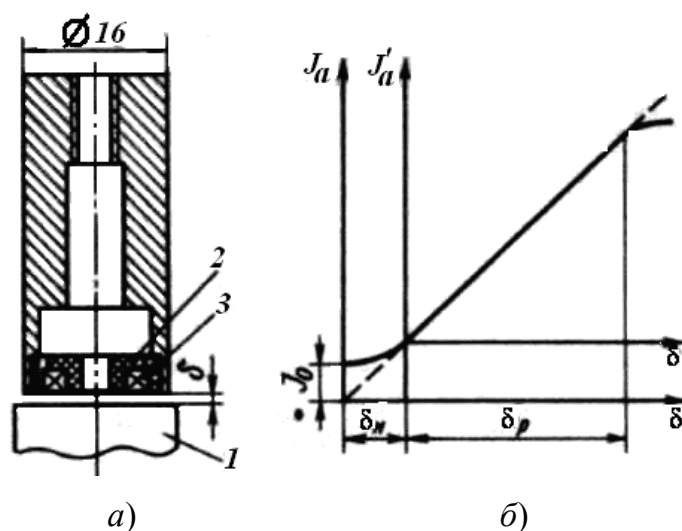


Рис. 4.26. Индуктивный бесконтактный преобразователь с ферритовым сердечником:  
а – конструкция; б – характеристика

Индуктивные преобразователи имеют малый участок линейной характеристики – рабочий участок  $\delta_p$  (рис. 4.26, б). При  $\delta = 0$  в системе есть остаточный ток  $I_0$ . Поэтому при исследовании устанавливают начальный зазор  $\delta_{и}$ , с которого начинается линейная характеристика (система координат  $I'_a = \delta'$ ).

Свойство ферромагнитных материалов изменять свою магнитную проницаемость под действием создаваемых в них механических напряжений используется для создания магнитоупругих индуктивных преобразователей. Их применяют для измерения крутящих моментов, малых перемещений в станках с ЧПУ. Здесь роль сердечника обычно выполняет какая-либо конструкционная деталь, передающая нагрузку и выполненная специально из ферромагнитного материала (пермаллой и др.).

Контактные измерительные приборы с индуктивными преобразователями используют для статических измерений или при небольших скоростях и ускорениях.

**Схема включения преобразователей.** Для повышения чувствительности преобразователи первой группы включают по мостовой схеме (рис. 4.27). Преобразователи, которые изменяют свое сопротивление под воздействием входных параметров, называют активными ( $+R_i, -R_i$ ), если они не изменяют сопротивление, – пассивными ( $R_0$ ).

Чувствительность мостовой схемы определяется отношением тока  $I_0$  в измерительной диагонали к входному параметру. Величина тока зависит от напряжения на диагонали моста  $U$ , от числа активных преобразователей, изменения их сопротивления  $\Delta R$  и способа включения в мостовую схему (рис. 4.27, в, см. индексы при  $R$  внутри мостовой схемы). Величину тока для рис. 4.27 определяют по формуле

$$I_0 = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3 R_4 + R_3 R_4 R_1 + R_4 R_1 R_2}. \quad (4.9)$$

При балансировке моста ток в измерительной диагонали равен нулю, т. е.

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (4.10)$$

Активные преобразователи, изменения сопротивлений которых имеют одинаковые знаки, должны включаться в противоположные плечи моста. Тогда при одинаковом сопротивлении всех плеч моста

из формулы (4.9) получим явную зависимость тока  $I_{0(i)}$  от числа активных преобразователей ( $i = 1, 2, 4$ ):

$$I_{0(1)} = U \frac{\Delta R}{4R^2}; \quad I_{0(2)} = U \frac{\Delta R}{2R^2};$$

$$I_{0(4)} = U \frac{\Delta R}{R^2}. \quad (4.11)$$

Следовательно, чувствительность мостовой схемы возрастает в два раза при двух активных преобразователях ( $I_{0(2)}$ ) и в четыре раза при четырех ( $I_{0(4)}$ ).

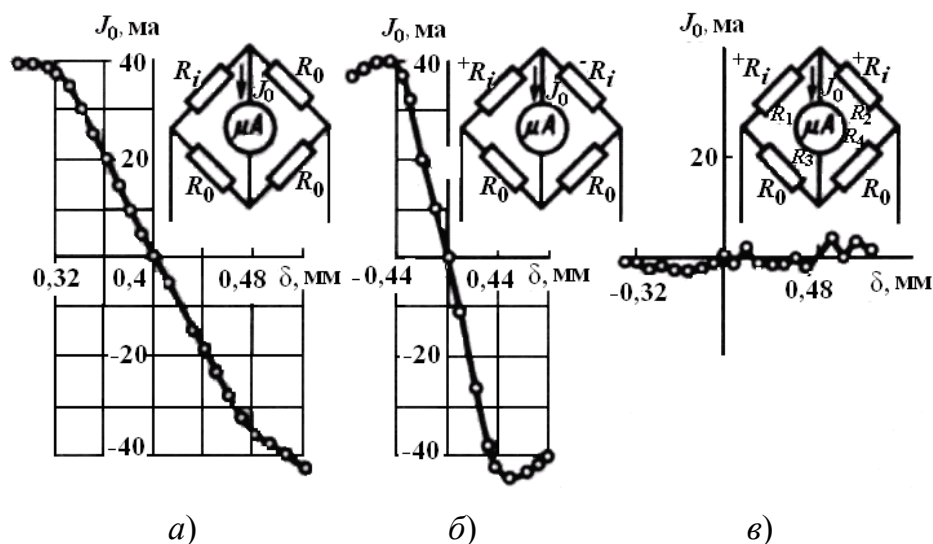


Рис. 4.27. Экспериментальные характеристики индуктивных преобразователей с ферритовым сердечником, включенных по мостовой схеме:

*a* – с одним активным преобразователем  $R_i$ ; *b* – с двумя активными преобразователями:  $-R_i, +R_i$ ; *v* – с двумя активными, неправильно включенными преобразователями

На рис. 4.27 построены экспериментальные характеристики различных мостовых схем с использованием индуктивных преобразователей по рис. 4.26, *a*. Начальный зазор  $\delta_m = 0,4$  мм. В соответствии с формулой (4.11) чувствительность мостовой схемы на рис. 4.27, *b* в два раза выше, чем схемы на рис. 4.27, *a*. Преобразователи в мостовой схеме на рис. 4.27, *v* включены неправильно, так как сопротивления одного знака  $+R_i$  находятся в смежных, а не в противоположных плечах. Теоретически, из условия (4.10) баланса моста ток должен



быть равен нулю:  $+R_i R_0 = +R_i R_0$ . Но в силу различных погрешностей небольшие колебания тока будут наблюдаться (график на рис. 4.27, в), что ошибочно может быть принято за результаты исследования.

**Устройство и основные характеристики преобразователей группы II. Пьезоэлектрический преобразователь.** В нем использован прямой пьезоэффект. Преобразователь широко применяется для измерения сил, давлений, ускорений. На рис. 4.28, а представлена типовая конструкция акселерометра. При воздействии на корпус 1 механических колебаний с ускорением  $\ddot{y}$  инерционная масса  $m$  с силой  $F = m\ddot{y}$  деформирует пьезокерамические элементы 2. Возникающий электрический заряд  $q$  пропорционален силе  $F$  и, следовательно, ускорению.

Чувствительность преобразователя определяется как отношение напряжения  $u$  (заряда  $q$ ) на обкладках пьезоэлемента к воздействию на него колебательному ускорению:

$$S = \frac{u}{\ddot{y}}, \text{ или } S = \frac{q}{\ddot{y}}.$$

Для пьезоэлектрических преобразователей характерны малые габаритные размеры и масса (5–60 г), они работают в диапазоне от долей Гц до десятков кГц. Диапазон измеряемых ускорений  $\ddot{y} = 0,01 \dots 400000 \text{ м/с}^2$ , высокая чувствительность  $S = 0,1 \dots 100 \text{ мВ} \cdot \text{с}^2/\text{м}$ . При исследованиях преобразователь жестко прикрепляют к исследуемой детали; если рабочая частота  $f_p > 2000 \text{ Гц}$  – преобразователи приваривают или приклеивают. Масса преобразователя не должна превышать 10 % массы исследуемой детали. Диапазон рабочих частот выбирают в пределах 20–30 % резонансной частоты. Необходимо учитывать наличие поперечной чувствительности, достигающей 2–20 %.

**Термоэлектрический преобразователь.** Из-за нагрева и неоднородности материалов в процессе резания металлов возникает термоэлектрический ток в цепи станок – инструмент – изделие – станок (рис. 4.28, б). Большая величина тока и малая инерционность позволяют исследовать процесс резания и регистрировать характер изменения сил резания, температуры, точно фиксировать время резания и производить другие измерения простыми средствами – стрелочным прибором 1 или осциллографом 2 без усилителя. Измерительную схему подключают к изолированному резцу и какой-либо корпусной

детали 3. Для усиления сигнала рекомендуется производить подключение непосредственно к обрабатываемой детали 4.

*Индукционный преобразователь.* При движении электрического проводника длиной  $\ell$  со скоростью  $v$  относительно магнитного поля с индукцией  $B$  в проводнике наводится электродвижущая сила  $E$  при числе витков  $\omega$ :

$$E = B\ell v\omega.$$

Это явление электромагнитной индукции положено в основу работы индукционных преобразователей. Наводимая ЭДС пропорциональна измеряемой линейной  $v$  или угловой  $\omega$  скоростям.

На рис. 4.28, в показана схема индукционного преобразователя для измерения линейной скорости. Сердечник 1 вместе с катушкой 2 перемещается между полюсами магнита  $N$  и  $S$ . Наводимая ЭДС пропорциональна скорости подвижной части конструкции 3, скрепленной с сердечником.

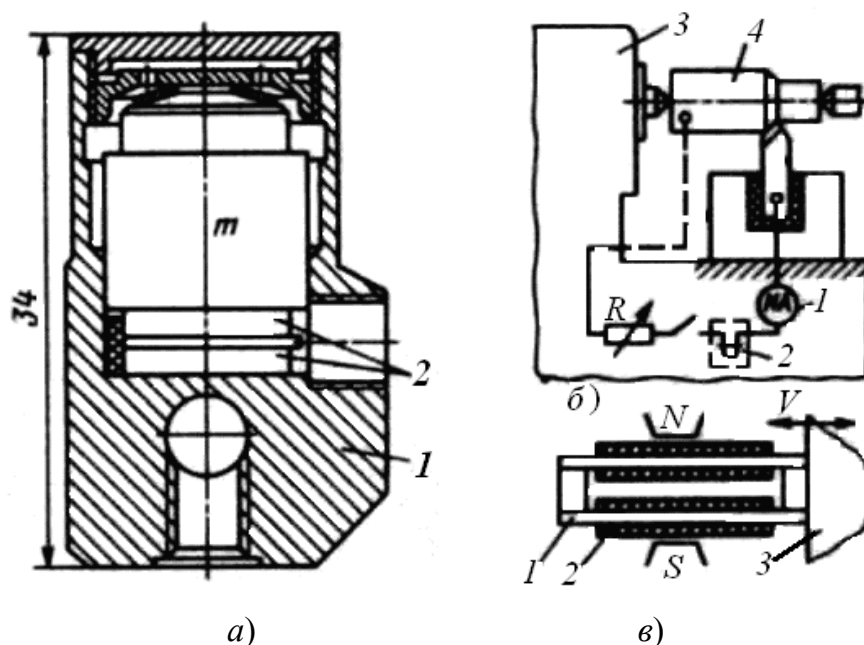


Рис. 4.28. Преобразователи группы электрического генератора:  
 а – пьезоэлектрический; б – термоэлектрический;  
 в – индукционный

В металлорежущих станках индукционные преобразователи широко используют для измерения скорости вращения (тахогенераторы постоянного и переменного тока). Для измерения длины или ускорения на выходе преобразователя включают, соответственно, интегрирующий или дифференцирующий контур.

#### 4.6.2. Экспериментальные методы исследования виброустойчивости станков

Для оценки виброустойчивости станков в лабораторных и производственных условиях используют следующие методы исследований: по предельной стружке, по амплитудофазочастотной характеристике (АФЧХ), по изменению коэффициента устойчивости и др. Первые два получили наибольшее распространение.

**Исследование виброустойчивости станков по предельной стружке.** Его выполняют в процессе резания. Создают реальные условия нагружения и работы подвижных соединений, исключают погрешность, связанную с линеаризацией системы.

Предельной стружкой считают максимальную ширину (глубину) среза, при которой работа осуществляется без вибраций. Предельную стружку определяют для каждого из фиксированных параметров резания или конструкции станка (скорости резания, подачи, вылета оправки и др.) при последовательном увеличении ширины (глубины) резания до момента интенсивного роста колебаний.

Схема измерения колебаний с использованием светолучевого осциллографа  $O$  приведена на рис. 4.29, *а*. Деталь  $1$  обрабатывают по цилиндрической поверхности проходным или широким резцом. Колебания регистрируют индуктивными преобразователями  $2$ , установленными с зазором  $\delta = 0,4$  мм симметрично по отношению к заготовке (шпинделю). Оба преобразователя являются активными, их включают в полумост, вторая часть которого встроена в усилитель  $У$ .

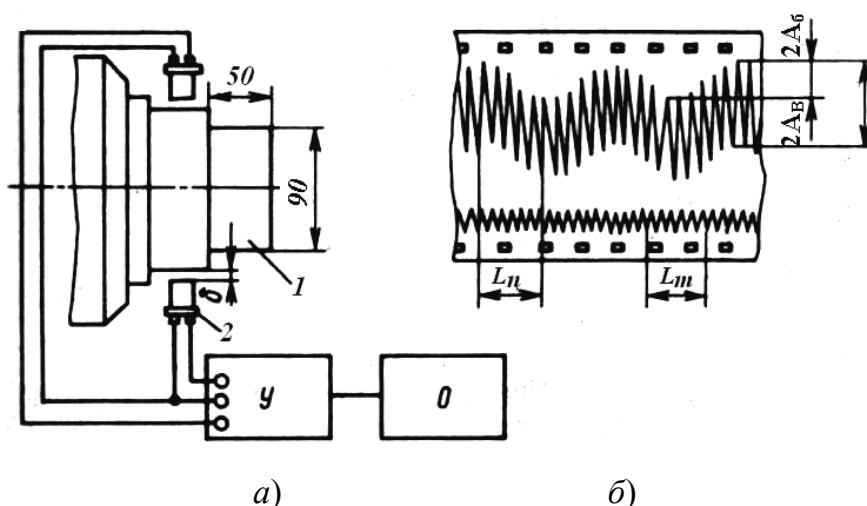


Рис. 4.29. Исследование колебаний шпинделя:  
*а* – измерительная схема; *б* – осциллограмма записи колебаний шпинделя

На осциллограмме (рис. 4.29, б) приведена запись колебаний заготовки с амплитудой  $A_B$ , на фоне которых четко просматривается биение шпинделя с амплитудой  $A_6$  и более низкой частотой. Вторая кривая представляет собой запись переменного тока частотой 50 Гц и используется как отметчик времени.

Частоту колебаний заготовки определяют по отрезкам  $l_n, l_m$ , которые содержат, соответственно,  $n$  и  $m$  периодов колебаний:

$$f = \frac{50 l_m n}{l_n m}.$$

Амплитуду колебаний  $A_B$  определяют при тарировке изменением зазора  $\delta$ .

Для определения предельной ширины резания  $b_{пр}$ , например, в функции скорости резания  $v$ , при каждом фиксированном значении  $v_i$  ширину резания  $b$  увеличивают до тех пор, пока измеренная амплитуда колебаний  $A_B$  не достигнет допустимого значения  $A_d$ .

Условию  $\frac{A_B}{A_d} = 1$  соответствует предельная ширина резания:

- для  $v_1$  задают ряд:  $b_1, b_2, \dots, b_{1пр}$ ;
- для  $v_2$  задают ряд:  $b_1, b_2, \dots, b_{2пр}$ ;
- .....
- для  $v_n$  задают ряд:  $b_1, b_2, \dots, b_{nпр}$ .

По точкам  $v_i - b_{iпр}$  строят границу устойчивости (рис. 4.30).

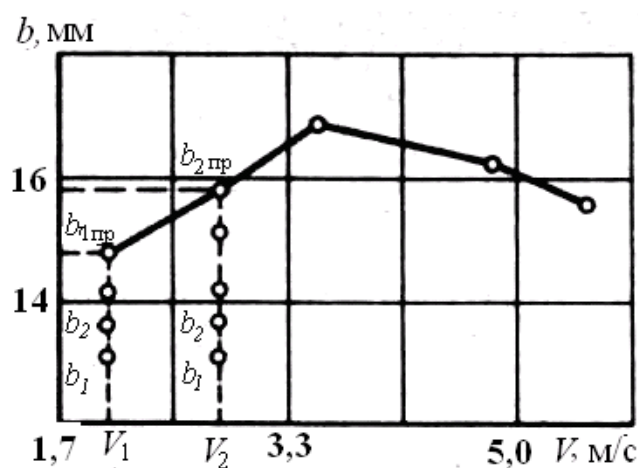


Рис. 4.30. Построение границы устойчивости по предельной ширине резания  $b_{пр}$  в функции  $v$

Периодическое возникновение и исчезновение колебаний свидетельствует о кинематических или конструктивных недостатках в станке, в частности о неудовлетворенном контакте конуса оправки.

Одним из методов поиска причин низкой виброустойчивости станков является определение форм колебаний, характеризующих пространственную деформацию станка. Под формой колебаний станка понимают совокупность отношений перемещений колеблющихся точек к какой-либо отдельной точке упругой системы, полученных в определенный момент времени. Для снятия формы колебаний выбирают опорную точку, с которой сравнивают колебания всех остальных.

Возбуждение колебаний осуществляется резанием в наиболее виброопасном режиме, измерение – индуктивными или проволочными преобразователями. Относительные амплитуды колебаний наносят на контуры станка. Дальнейшему исследованию подлежит тот элемент станка, где отклонения наибольшие.

**Исследование виброустойчивости станков по АФЧХ ДС.** Наиболее точно АФЧХ определяют экспериментально.

Характеристика эквивалентной упругой системы должна определяться на работающем станке или на холостом ходу. В последнем случае сохраняется подвижность соединений и допускаемая погрешность невелика. Но в обоих случаях возникают трудности в создании внешней нагрузки и измерении относительных смещений между подвижными звеньями станка: инструментом и заготовкой.

На практике часто характеристики  $W_{\text{ЭУС}}$  определяют на неработающем станке. Погрешность будет тем меньше, чем меньше влияние подвижных соединений упругой системы во всем или каком-либо частотном диапазоне. При значительном влиянии подвижных соединений наибольшие отклонения от действительной характеристики будут по амплитуде и фазе колебаний и наименьшие по собственной частоте.

При снятии статической характеристики  $K_{\text{ЭУС}}$  нагрузка во времени постоянна. Методика и приборы те же, что и при экспериментальном определении жесткости станков. Если нагрузку между конечными звеньями станка  $P_0$ , несущими деталь и инструмент, направить по равнодействующей сил резания, а отжатие  $y_0$  измерять по нормали к обработанной поверхности, то после линеаризации статическую характеристику определяют из отношения

$$K_{\text{ЭУС}} = \frac{y_0}{P_0}.$$

С помощью двухкоординатного самописца ПДС-021 характеристику можно строить автоматически.

При определении динамической характеристики ЭУС на несущие конструкции воздействует переменная во времени нагрузка – входная координата. В качестве выходной координаты принимают относительные упругие смещения тех же конструкций. Направление нагружающей силы и измеряемых упругих смещений сохраняются такими же, как и при снятии статической характеристики.

Блок-схема установки для снятия АФЧХ ЭУС металлорежущих станков показана на рис. 4.31. Силовое воздействие на упругую систему станка осуществляют по синусоидальному закону электромагнитным вибратором В и регистрируют преобразователем силы ПС. Относительные смещения несущих конструкций регистрируют преобразователем перемещения ПП.

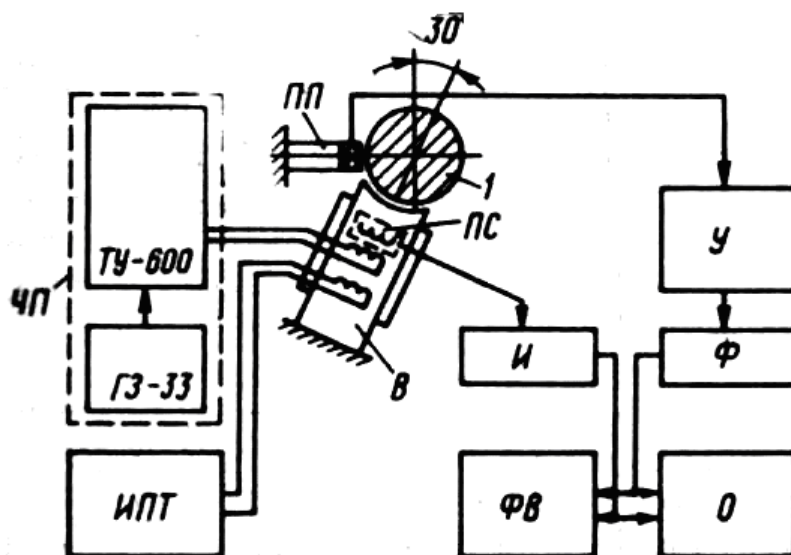


Рис. 4.31. Блок-схема установки для определения АФЧХ ЭУС станков

Вибратор и преобразователь перемещения, в соответствии со схемой определения статической характеристики, жестко крепят на суппорте (столе) станка, а оправку I – в шпинделе.

Вибратор имеет две катушки: постоянного и переменного тока. Катушка постоянного тока питается от источника ИПТ и создает постоянную составляющую нагрузки, величина которой зависит от предварительного натяга в системе и силы резания, характерной для данного типа станка. Катушка переменного тока питается от частотного преобразователя ЧП и создает переменную составляющую на-

грузки для возбуждения вынужденных колебаний. Амплитудное значение переменной нагрузки должно быть минимальным и определяется чувствительностью аппаратуры.

Частотный преобразователь должен обеспечивать диапазон частот 20–600 Гц для легких и средних станков, синусоидальную форму напряжения и дискретность регулирования частоты 0,5 Гц. На схеме рис. 4.31 частоту регулируют звуковым генератором ГЗ-33, сигнал от которого усиливается трансляционным усилителем ТУ-600. От преобразователей ПП и ПС сигнал через усилитель У, фильтр Ф и интегратор И подается на фазочувствительный вольтметр ФВ и электронный осциллограф О. Показания индикаторов вольтметра соответствуют координатам  $Re_{\text{ЭУС}}$  и  $Im_{\text{ЭУС}}$  АФЧХ исследуемого станка.

Перемещения и силы измеряют индуктивными и тензометрическими преобразователями. Силу можно измерять через измерительную обмотку вибратора. Наблюдение и контроль за формой сигналов осуществляют по осциллографу.

При снятии АФЧХ станка применяют бесконтактный или контактный вибратор: первый при вращающемся шпинделе, когда сохраняется подвижность соединений в несущих конструкциях, второй на неработающем станке.

Общий вид бесконтактного вибратора 1, установленного на столе координатно-расточного станка мод. КР-450, показан на рис. 4.32, а [5].

Между оправкой 2 и сердечником вибратора существует начальный зазор 0,5–1,5 мм. Переменную силу регистрируют через измерительную обмотку; упругое смещение – индуктивным преобразователем 3.

Принципиальная схема одного из контактных вибраторов приведена на рис. 4.32, б. Якорь 1 жестко скреплен с подвесками 2, которые выполняют роль упругих опор. На одном конце якоря устанавливают тензометрический наконечник 3, через который производят нагружение и одновременно регистрацию действующих на станок сил с помощью преобразователей 4. В средней части якорь свободно перемещается внутри катушек переменного и постоянного тока. При подаче напряжения на катушки якорь выталкивается и нагружает элементы станка.

Разработанные электромагнитные вибраторы данного типа развивают переменную силу 50–150 Н в диапазоне частот от 20 до 550 Гц и постоянную силу 75–1000 Н, обеспечивают простоту управления по амплитуде силы и частоте.

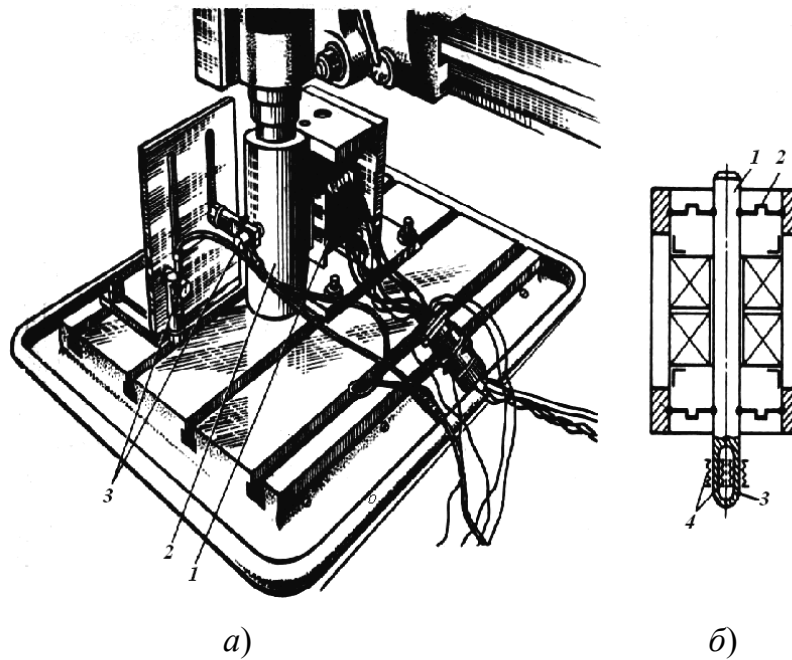


Рис. 4.32. Вибраторы для нагружения станка периодической возмущающей силой:  
*a* – бесконтактный; *б* – контактный

Если снятие АФЧХ не автоматизировано, то координаты  $Re$  и  $Im$  регистрируют по стрелочным приборам фазочувствительного вольтметра и наносят в масштабе на комплексной плоскости. Каждой частоте возмущающего воздействия  $\omega$  соответствует одна точка. Все точки исследуемого диапазона частот соединяют и получается экспериментальная АФЧХ. Перемножая построенную характеристику ЭУС со статической или динамической характеристикой резания, определяют отрезок на вещественной оси  $Re_{раз}^0$  и оценивают устойчивость станка.

Наряду с изложенным представляет интерес метод определения АФЧХ непосредственно в процессе резания. При необходимости частоту возмущения регулируют изменением числа лезвий, выступов (пазов) или частотой вращения шпинделя.

Возникающие в процессе резания колебания рассматривают как случайные. Измеряя силы резания, отжатия несущих элементов и смещения по фазе, после статистической обработки осциллограмм строят АФЧХ (АФЧ, ФЧХ).

Изложенное представление о динамике станков и методах исследования устойчивости выполнено в предположении детерминированных параметров ДС. Это вызвано скорее простотой изложения, чем отражением объективных условий. Известно, что в ДС параметры УС, процессов резания, трения и др. не могут считаться одинаковыми даже



для станков одной серии. Экспериментальные исследования показывают, что жесткость, основная частота колебаний и логарифмический декремент колебаний часто распределяются по нормальному закону.

На рис. 4.33, *а* показана экспериментальная *1* и аппроксимированная *2* по нормальному закону плотность вероятности  $f(W)$  распределения податливости  $W$  станков мод. КР-450. Для тех же станков на рис. 4.33, *б* показана экспериментальная *1* и аппроксимированная *2* по нормальному закону плотность вероятности  $f(Re_{\text{ЭУС}}^0)$  распределения интегральной характеристики ЭУС – отрезков  $Re_{\text{ЭУС}}^0$  при частоте вращения 90 об./мин. Из-за рассеяния исходных параметров ДС этих станков вместо детерминированной характеристики получается область существования АФЧХ, заключенная между кривыми *1* и *2* (рис. 4.33, *в*). Поэтому для каждой из исследованных частот  $\omega = 100 \dots 350 \text{ с}^{-1}$  существует множество точек.

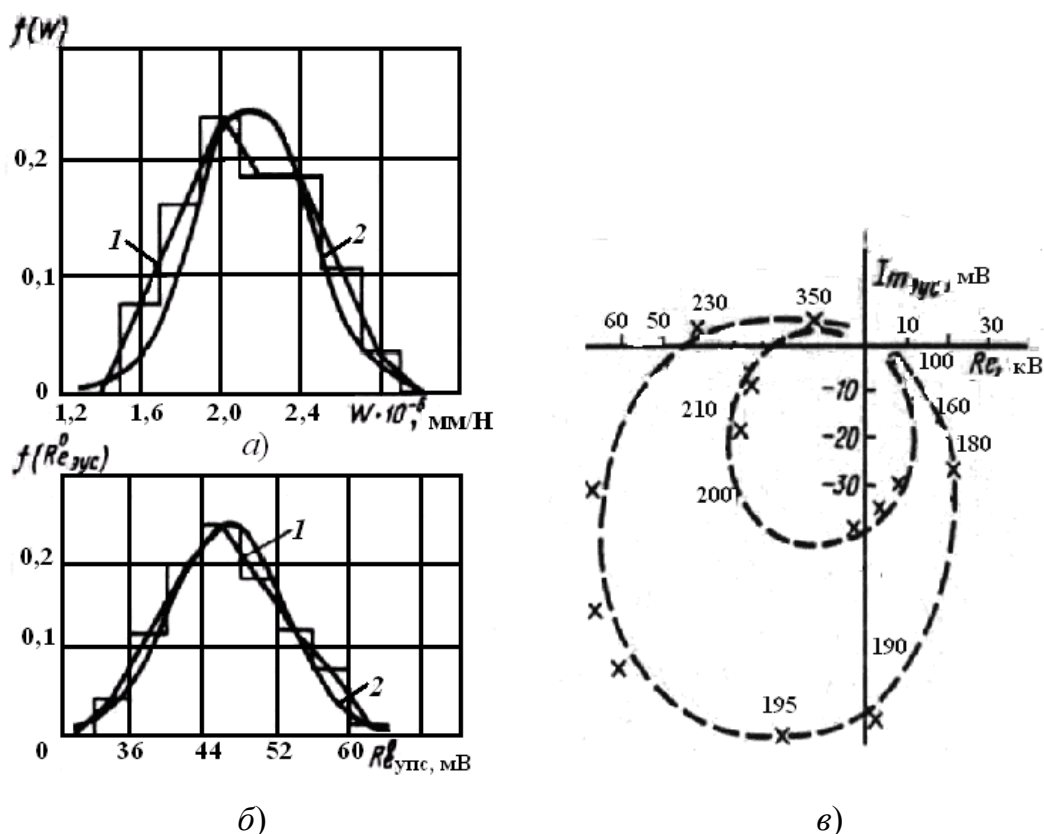


Рис. 4.33. Рассеяние основных параметров ДС станка:  
*а* – рассеяние податливости шпиндельных узлов токарно-винторезного станка мод. 16К20; *б* – рассеяние отрезков  $Re_{\text{ЭУС}}^0$  станка мод. КР-450 при частоте вращения шпинделя  $n = 90$  об./мин; *в* – поле рассеяния АФЧХ УС станка мод. КР-450

Очевидно, что решение задач динамики может быть осуществлено только с привлечением теории вероятности. Граница устойчивости превращается в полосу устойчивости. Для этих условий введен вероятностный критерий оценки устойчивости станков:

$$Re_{\text{раз}}^0 < |1 - \beta v_k|,$$

где  $\beta v_k$  характеризует рассеяние параметров ДС станков.

Применение вероятностных методов расчета является одним из основных направлений исследования динамической системы станков.

## 4.7. Методика исследования внутренних напряжений базовых элементов станков

Методы экспериментальных исследований [6]:

- 1) деформируемой сетки;
- 2) хрупких покрытий;
- 3) поляризационно-оптический;
- 4) муаровых полос;
- 5) спекл-анализа;
- 6) голографический.

### 4.7.1. Метод деформируемых сеток

Исследуемая поверхность базовой детали шлифуется, полируется и на нее наносится сетка в виде квадратов (прямоугольников) (рис. 4.34). После этого деталь нагружают и производят анализ [6].

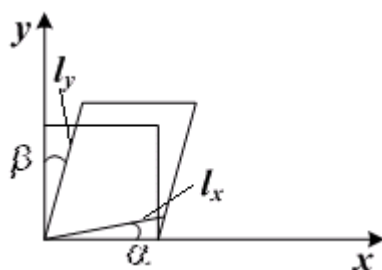


Рис. 4.34. Схема к расчету деформаций

Происходит деформация сетки. По полученным параметрам ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) определяют деформацию элемента:

$$\xi_y = \frac{l_y - l_0}{l_0}; \quad \xi_x = \frac{l_x - l_0}{l_0}.$$

Затем рассчитывают напряжения:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{l_x - l_0}{l_0} + \mu \frac{l_y - l_0}{l_0} \right); \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{l_x - l_0}{l_0} \mu + \frac{l_y - l_0}{l_0} \right); \\ \xi_{yx} = \frac{E}{2(1+\mu)} (\alpha + \beta). \end{cases}$$

Недостаток метода – сложность измерения всех параметров сетки после деформации и высокая трудоемкость эксперимента.

#### 4.7.2. Поляризационно-оптический метод

Используют модели из оптически активного материала (стекло, эпоксидные смолы), а также покрытия из них. На рис. 4.35 приведена схема установки.

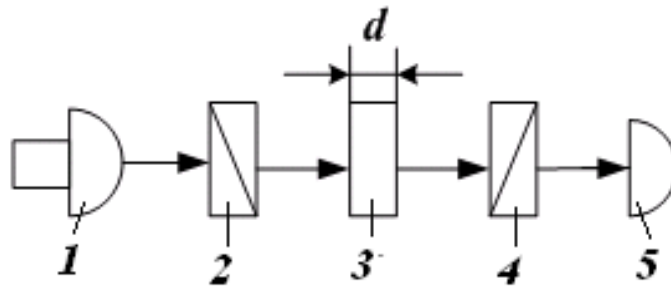


Рис. 4.35. Схема установки:

1 – источник монохроматического света (свет определенной длины волны); 2 – поляризатор; 3 – модель; 4 – анализатор; 5 – экран

На рис. 4.36 приведены схематические изображения интенсивностей световых потоков. От источника света  $I$  интенсивностью  $I_0$  световая волна пространственной формы проходит через поляризатор, преломляясь в точке А.

Из поляризатора световой поток проходит через модель, где он разделяется на два направления, соответствуя направлениям главных напряжений ( $\sigma_1, \sigma_2$ ). Пройдя через модель, световой поток попадает на анализатор, который пропускает его только в одной плоскости. Пройдя через анализатор, он попадает на экран.

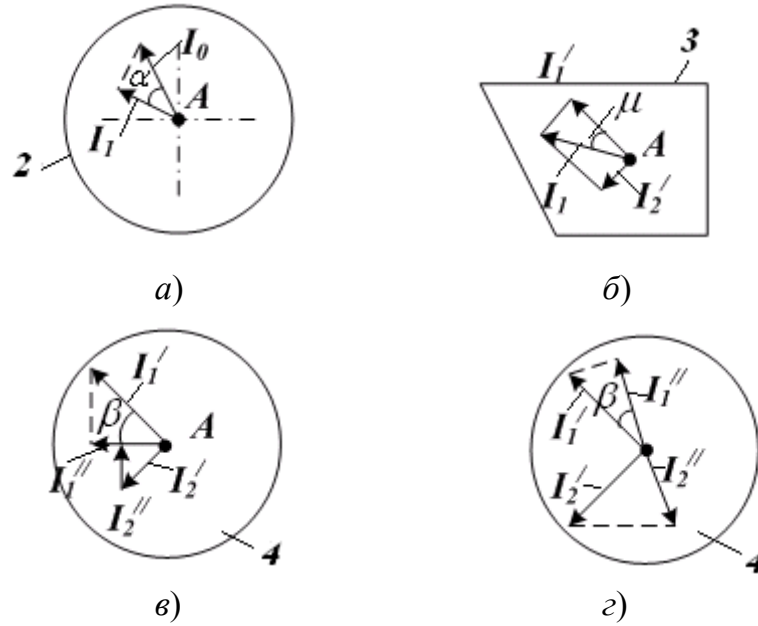


Рис. 4.36. Схемы к расчету параметров

Используя схемы (рис. 4.36), получим:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 \cos \alpha; \\
 \left. \begin{aligned}
 I_1' &= I_0 \cos \alpha \cdot \cos \mu \\
 I_2' &= I_0 \cos \alpha \cdot \sin \mu
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 I_1'' &= I_0 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \mu \cdot \cos \beta \\
 I_2'' &= I_0 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \mu \cdot \sin \beta
 \end{aligned} \right\} \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

$$I_1' = d \frac{\mathfrak{G}_b}{\mathfrak{G}_{m_1}}; \quad I_2' = d \frac{\mathfrak{G}_b}{\mathfrak{G}_{m_2}}. \quad (4.13)$$

Обозначим:  $\frac{\mathfrak{G}_b}{\mathfrak{G}_{m_1}} = C\sigma_1$ ;  $\frac{\mathfrak{G}_b}{\mathfrak{G}_{m_2}} = C\sigma_2$ , где  $\mathfrak{G}_b$  – скорость прохождения светового потока в воздухе;  $\mathfrak{G}_{m_1}$  – скорость потока в модели;  $d$  – толщина модели.

Пройдя через модель, световые потоки изменяют не только направление, но и получают смещение в направлении потока  $\delta$ :

$$\delta = Cd\sigma_1 - Cd\sigma_2 = Cd(\sigma_1 - \sigma_2) = n\lambda, \quad (4.14)$$

где  $C$  – оптическая постоянная модели – разность хода лучей пропорционально длине волны источника света  $\lambda$ ;  $n$  – коэффициент пропорциональности.

Тогда

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n\lambda}{Cd} = n\sigma'_0; \quad \frac{\lambda}{Cd} \rightarrow \sigma'_0,$$

где  $\sigma'_0$  = уровень напряжения в каждой точке.

Направление темных и светлых полос на экране отражает направление напряжений. Чтобы определить численные значения напряжений, используют образцы из такого же материала, как модель (рис. 4.37).

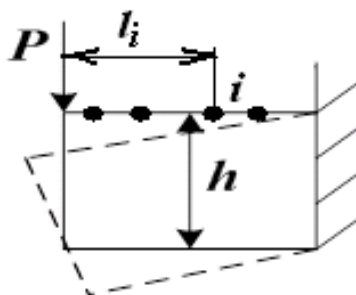


Рис. 4.37. Схема к получению  $\sigma'_0$

В пограничных точках модели определяют  $\sigma'_0$ .

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n\sigma'_0.$$

Так как  $\sigma_2 = 0$ , то с учетом точного решения  $\sigma_i = \frac{Pl_i}{dh^2}$  получим:

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma_1}{n} = \frac{Pl_i}{dh^2n}. \quad (4.15)$$

В выделенной точке модели рассчитывают напряжение по формуле (4.15) и оценивают по уровню освещенности полосы.

Зная номер полосы, оценивают внутреннее напряжение в исследуемом объекте.

Недостаток: сложность изготовления модели без внутренних остаточных напряжений.

При исследовании сложных корпусных деталей таким методом используют оптически активные покрытия, которые наносят на исследуемую поверхность.

Существует два способа: в отраженном угловом и нормальном световых потоках (рис. 4.38).

Недостатки:

- 1) сложность нанесения покрытия;
- 2) погрешности измерений, зависящие от направления падения луча и от качества адгезионного взаимодействия покрытия и исследуемой поверхности.

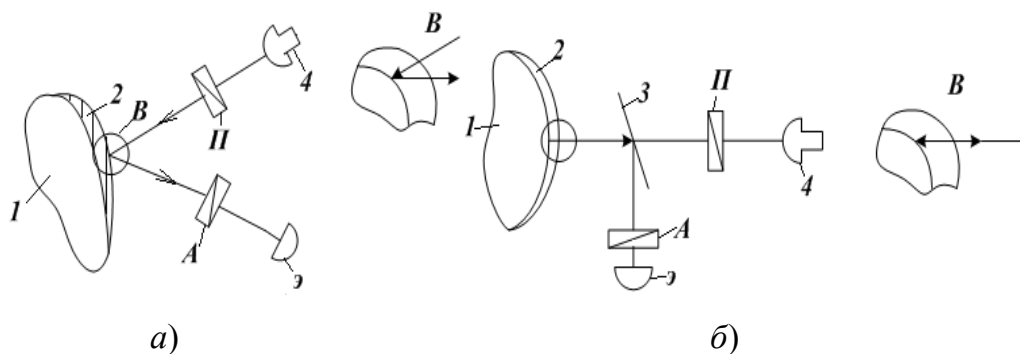


Рис. 4.38. Схемы исследования НДС:  
*а* – в отраженном угловом световом потоке; *б* – в отраженном нормальном световом потоке: 1 – поверхность; 2 – оптический слой; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – лазер

Для уменьшения погрешности и снижения трудоемкости используют отдельные оптические датчики, которые наклеивают на исследуемую поверхность в отдельных точках (рис. 4.39).

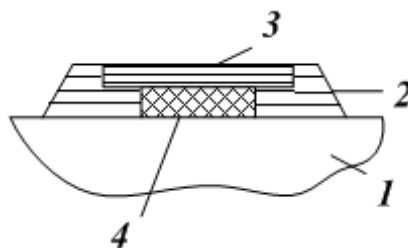


Рис. 4.39. Схема оптического датчика:  
1 – исследуемая поверхность; 2 – слой клея; 3 – пластинка из оптически активного материала; 4 – наполнитель

### 4.7.3. Спекл-анализ

Исследуемая поверхность шлифуется и полируется, а затем фотографируется в отраженном свете (рис. 4.40).

Производится нагружение базовой детали и фотографирование на новой светочувствительная пластинке. В результате светлые пятна смещаются от деформаций. Затем, совместив две пластинки и пропустив через них световой поток, получают на экране картину интерференционных полос, которая показывает направление деформаций и напряжений.

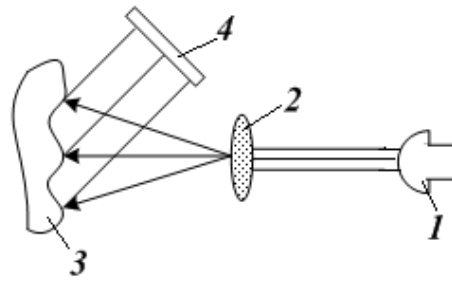


Рис. 4.40. Схема измерения НДС:  
 1 – источник света; 2 – рассеивающая линза; 3 – поверхность;  
 4 – светочувствительная пластинка

Достоинство: простота реализации.

Недостаток: высокая чувствительность схемы измерения от свойств окружающей среды (ОС).

#### 4.7.4. Голографический метод

Для его реализации используют прозрачные и непрозрачные модели, а также реальные объекты (рис. 4.41).

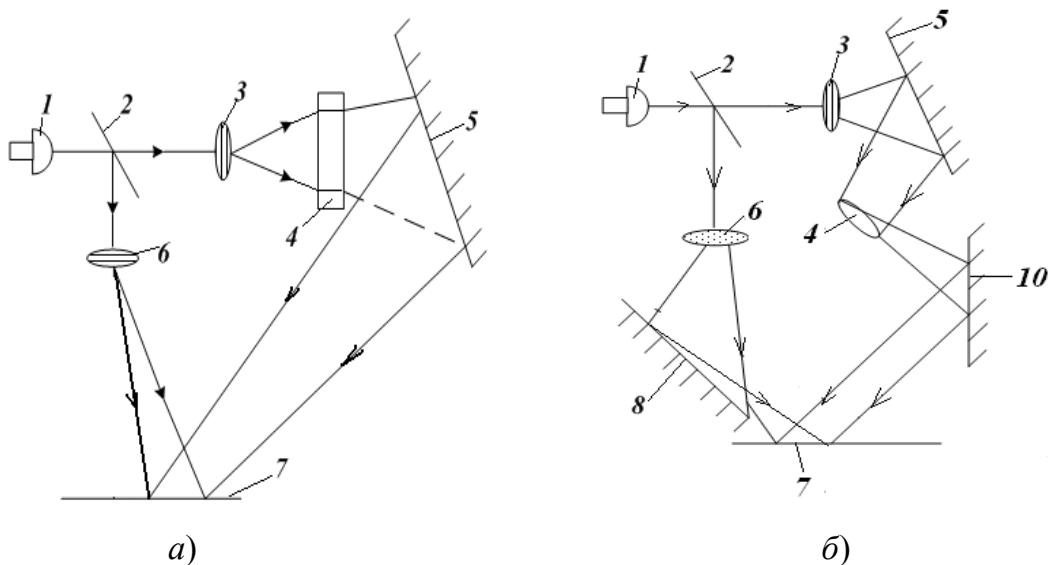


Рис. 4.41. Схемы голографических установок:  
 а – с прозрачными моделями; б – с непрозрачными моделями:  
 1 – источник света; 2 – полупрозрачное зеркало; 3, 6 – линзы;  
 5, 8, 10 – непрозрачные зеркала; 4 – исследуемая модель

При реализации этого метода фиксируется интерференционная картина в исходном состоянии и такая же картина при нагружении. Смещение полос интерференции указывает на направление и величину деформаций и напряжений.

Достоинство: можно исследовать натуральные объекты.

Недостатки: сложность подготовки поверхности для обеспечения точности измерения; высокая чувствительность к окружающей среде.

#### ***4.7.5. Метод хрупких покрытий***

Для его реализации поверхность шлифуется и покрывается хрупким покрытием (канифоль). Затем нагружается, и по направлению главных напряжений возникают микротрещины, которые фотографируют и производят качественную оценку распределения деформаций и напряжений.

#### ***4.7.6. Метод муаровых полос***

На исследуемую поверхность наносят полосы (вертикальные или под прямым углом). На оптически прозрачную пластинку также наносят полосы.

При наложении пластинки на объект получается оптическая картинка муаровых полос, что позволяет их легко измерить и определить деформации и напряжения.

### **4.8. Методы исследования свойств композиционных материалов**

*Дериватография* – это метод, позволяющий измерять одновременно температуру, изменение массы, скорость изменения веса и изменение энтальпии одной единственной пробы исследуемого вещества. Таким образом, обеспечивается абсолютная тождественность условий эксперимента для различных измерений, что, во-первых, повышает точность результатов испытаний и полноту оценки термоэффектов; во-вторых, сокращает время проведения термических исследований [7].

Схема дериватографа ОД-102 (прибор, реализующий метод дериватографии) изображена на рис. 4.42.

Испытуемое вещество помещается в тигель 1 и нагревается в электропечи 2. Изменение температуры во времени регистрируется с помощью термопары, находящейся внутри пробы, и гальванометра 3. Изменение массы фиксируется с помощью весов 4. Направление и величина изменения энтальпии в результате физических и химических превращений в веществе устанавливается аналогично методике диф-



ференциального термического анализа (ДТА). Для этого с помощью гальванометра 5 фиксируется разность температур между испытуемым материалом, находящимся в тигле 1, и инертным веществом ( $Al_2O_3$ ) в тигле 6.

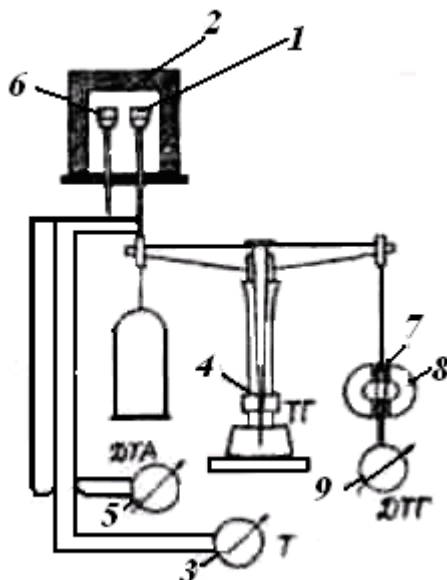


Рис. 4.42. Схема дериватографа:

- 1 – тигель с исследуемым веществом; 2 – электропечь;  
 3 – гальванометр для регистрации температуры; 4 – термовесы;  
 5 – ДТА-гальванометр; 6 – тигель с инертным веществом;  
 7 – катушка; 8 – магниты; 9 – ДТГ-гальванометр

С помощью прибора можно измерить также и скорость изменения массы, используя катушку с большим числом витков 7, подвешенную к коромыслу весов и движущуюся в поле магнита 8. Силовое поле магнитов индуцирует в движущейся катушке ток, напряжение которого (пропорциональное отклонению коромысла весов) регистрируется гальванометром 9.

*Анализ кривой ДТА позволяет определить:*

1. *Направление изменения энтальпии* происходящего в результате теплофизического процесса: эндоэффект (процесс, сопровождающийся поглощением тепла, например, плавление) на термограмме ДТА реализуется в виде пика, направленного вниз; экзоэффект (процесс, сопровождающийся выделением тепла, например, кристаллизация) на термограмме реализуется в виде пика, направленного вверх.

2. *Характеристические температуры* (температуры плавления  $T_{пл}$ , кристаллизации  $T_{кр}$ , испарения  $T_{исп}$ , сублимации  $T_{сб}$  и др.), соответствующие максимуму пиков на кривой ДТА в случае эндотер-

мической реакции, а в случае экзотермического превращения – температуре начала взаимодействия. Путем сопоставления полученных данных с литературными возможна как идентификация материала, так и заключение о его чистоте (примеси приводят к смещению характеристических температур). По кривой ДТА обычно определяют температуры превращений, не связанных с изменением массы пробы (для этого используют кривую ДТГ, имеющую более идеальную базовую линию).

3. Величину изменения энтальпии  $\Delta H$  в результате теплофизического процесса, рассчитываемую как площадь, лежащую под максимумом кривой (площадь пика). Для этого вначале получают калибровочную кривую (кривую ДТА вещества с известной теплотой превращения) и определяют калибровочный коэффициент – отношение заранее известной теплоты превращения к площади пика превращения. Далее, для того чтобы определить теплоту изучаемого превращения, площадь пика умножается на калибровочный коэффициент. В качестве эталонов применяют чаще всего  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{AgNO}_3$  и  $\text{CaCO}_3$ . Основная проблема при расчете площади под кривой состоит в определении базовой линии (линия  $ac$  на рис. 4.43). Трудности ее определения вызваны в основном изменением теплопроводности и теплоемкости пробы в результате химического или физического превращения. В связи с этим расчет величины изменения энтальпии возможен только с погрешностью 5–10 %.

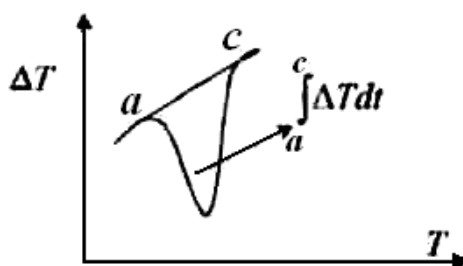


Рис. 4.43. Фрагмент кривой дифференциального термического анализа

4. Анализ кривой изменения массы – термогравиметрической (ТГ) – позволяет в подавляющем большинстве случаев определить количественный состав испытуемой пробы на основании изменения ее массы.

Зная величину навески ( $m_0$ ), можно вычислить содержание всех ее составляющих, если отдельные стадии разложения пробы образуют четко определенные «волны» на кривой ТГ.

Однако случаи, когда химические реакции в пробе протекают в различных интервалах температур, встречаются достаточно редко.

Чаще имеет место «перекрытие» химических реакций на шкале температур, что приводит к затруднению качественной оценки изломов на ТГ кривой.

5. *Анализ кривой* – дифференциально-термогравиметрической (ДТГ) – значительно облегчает объяснение основной кривой ТГ, особенно в случаях, когда превращения в исследуемом материале следуют друг за другом или перекрываются. Сливающиеся и трудно идентифицируемые на кривой ТГ тепловые эффекты разделяются и становятся четко различимыми на ДТГ. По кривой ДТГ определяют характеристические температуры процессов, сопровождающиеся изменением массы образца.

Путем *совместного анализа кривых ДТА и ДТГ* можно производить оценку происходящих в пробе термических реакций одновременно с двух сторон: с точки зрения энтальпии и изменения массы образца. Наиболее типичными являются следующие случаи.

Кривая ДТГ не обнаруживает изменений, а изменяется только кривая ДТА. Это свидетельствует, что в пробе происходят только физические превращения (не сопровождающиеся изменением веса), такие как изменение фазового (агрегатного) состояния, перекристаллизация и др.

Изменения на кривых ДТА и ДТГ совпадают. Это указывает на то, что в пробе произошло химическое превращение, например, окисление, термическая диссоциация и т. п. (химические превращения, как правило, сопровождаются изменением массы реагирующих веществ).

Изменения есть на обеих кривых (ДТА и ДТГ), но они не совпадают. Это указывает на то, что участок кривой ДТА создан в результате сложения термических эффектов двух или нескольких химических реакций, а возможно, и физических превращений в образце. Кривая ДТА регистрирует результирующий термический эффект.

#### 6. *Калориметрия*

Существует множество *калориметрических методов*. Наиболее распространенными из них являются следующие:

1. Адиабатическая калориметрия.
2. Динамическая калориметрия, включающая дифференциальную калориметрию Кальве (ДТК), дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) и др.
3. Микрокалориметрия.
4. Деформационная калориметрия.

В качестве примера калориметрических методов рассмотрим метод ДСК, лишенный вышеперечисленных недостатков метода ДТА.

В техническом исполнении ДСК отличается от ДТА наличием индивидуальных нагревателей для камер образца и эталона. Два автономных микронагревателя, расположенные в каждой из камер, автоматически выравнивают разность температур, возникающую в процессе нагрева между измерительной и сравнительной камерами. При этом автоматически регистрируется необходимая для балансировки (выравнивания) тепловая мощность (или тепловой поток). Суммарный тепловой эффект превращения в исследуемом материале, равный изменению энтальпии образца, определяется по площади пика на термограмме зависимости тепловой мощности от температуры. При помощи калибровочного коэффициента кривая ДСК может быть представлена в виде зависимости теплоемкости  $C_p$  от температуры. Таким образом, фундаментальным отличием ДСК от ДТА является регистрация непосредственно тепловой мощности процесса. При этом соблюдается полное внешнее сходство термограмм.

Новейшие ДСК (DSK-7) позволяют производить измерения в интервале температур 100–1000 °К с 11 различными скоростями – от 0,3 до 320 град/мин при погрешности измерений  $\pm 0,1$  %.

#### **4.9. Методы исследования состава и свойств поверхностных слоев деталей**

Под поверхностными слоями понимают часть объема материала толщиной 1–10 атомных слоев, лежащую под поверхностным монокристаллическим слоем.

Среди методов анализа состава и оценки топографии поверхностных слоев материалов можно выделить две группы:

1. *Спектроскопические методы*, предназначенные для изучения химической структуры (состава).

2. *Микроскопические методы*, предназначенные для изучения физической структуры (морфологии поверхности).

Спектроскопические методы анализа поверхности основаны на изучении реакции поверхности на воздействие различных факторов.

Классификация спектроскопических методов:

1. По виду зондирующего поверхность потока частиц (табл. 4.1). Существует четыре основных вида зондирующих потоков частиц: электроны, ионы, нейтральные частицы и фотоны.

2. По виду эмиттируемых (детектируемых) частиц (табл. 4.1).

Зондирующие поверхность частицы вызывают эмиссию вторичных частиц: электронов, ионов, фотонов или нейтральных атомов, несущих информацию о поверхности на соответствующий детектор.

3. По диапазону длин электромагнитных волн зондирующего излучения. Различают:  $\gamma$ -спектроскопию, рентгеновскую, оптическую и радиочастотную спектроскопии.

4. По типам квантовых переходов или видам движения в молекулах:

– *электронная* – изучает электронные переходы внутренних оболочек, которые осуществляют атомы, молекулы и конденсированные среды;

– *колебательная* – изучает колебательные переходы молекул между колебательными состояниями;

– *вращательная* – изучает вращательные переходы молекул с одних вращательных уровней на другие;

– *магнитная* – изучает переходы магнитной структуры;

– *электрическая* – изучает переходы электрической структуры;

– *тонкой структуры* – изучает переходы тонкой структуры (спин – орбитальное взаимодействие);

– *сверхтонкой структуры* – изучает переходы сверхтонкой структуры (взаимодействие электронного момента атома с ядерным моментом).

5. По типам исследуемых объектов:

1) спектроскопия атомов;

2) молекулярная спектроскопия;

3) спектроскопия конденсированных сред;

4) ядерная спектроскопия.

Таблица 4.1

**Классификация спектроскопических методов по виду зондирующего и детектируемого потоков**

Частицы		Зондирующие поверхность частицы			
		Фотоны ( $h\nu$ )	Электроны (e)	Ионы ( $M^+$ )	НЧ ( $M^0$ )
Вид эмиссии	$c$	РФЭС, УФЭС	ОЭС		
	$h\nu$	КРС, ИКС			
	ионы		МСЭПЗ	ВИМС, СИР	МСБА
	НЧ ( $M^0$ )		ЭСД		

Примечание. НЧ – нейтральные частицы.

**Электронная спектроскопия.** К основным методам электронной спектроскопии относятся рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), оже-электронная спектроскопия (ОЭС) и ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС). Эти методы, созданные на основе исследований К. Зигбана и сотрудников, первоначально имели общее название ЭСХА – электронная спектроскопия для химического анализа. В их основе лежат процессы, происходящие в электронной подсистеме твердого тела при облучении его фотонами и электронами.

Рентгеновские фотоны (рис. 4.44), падающие на поверхность образца с определенной энергией, вызывают явление фотоэффекта. Когда энергия характеристического излучения изменяется в диапазоне от 132,3 эВ (УМξ) до 8048 эВ (CuKa), происходит фотовозбуждение внутренних уровней (РФЭС, ОЭС); при  $h\nu < 40,8$  эВ имеет место возбуждение внешних валентных орбиталей атомов (УФЭС). Далее, анализатор разделяет поток электронов, «выбиваемых» из поверхности образца по кинетическим энергиям ( $E_{кин}$ ), а детектор определяет значение  $E_{кин}$ . Зная энергию поглощенного фотона  $h\nu$ , кинетическую энергию выбитого электрона  $E_{кин}$ , с помощью уравнения Эйнштейна можно рассчитать  $E_{св}$  – энергию связи электрона изучаемого уровня с ядром:

$$E_{св} = h\nu - E_{кин} - \phi, \quad (4.16)$$

где  $\phi$  – константа прибора.

Идентификацию химических элементов, содержащихся в поверхности изучаемого материала, проводят по  $E_{св}$ , приведенным в различных литературных источниках.

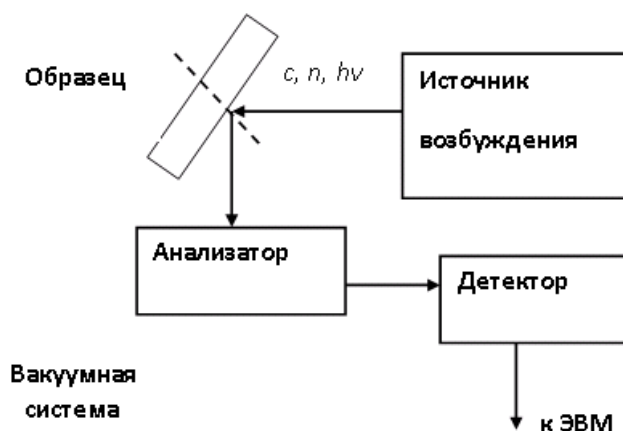


Рис. 4.44. Схема спектроскопических методов исследования поверхности (РФЭС, ОЭС, УФЭС, СИР, ВИМС)

Глубина профилирования может изменяться от 1 до 10 нм в зависимости от угла выхода фотоэлектронов и энергии возбуждающего излучения ( $h\nu$ ). Таким образом, вращая образец и изменяя источник излучения, возможно проведение послойного анализа поверхности.

По электронным спектрам можно делать вывод не только об элементном составе, но и о химическом строении материала на основе анализа химических сдвигов основных уровней изучаемого атома. Установлено, что сдвиг энергии связи любого электронного уровня в атоме пропорционален степени его окисления, т. е. зависит от ближайшего окружения этого атома.

Кроме этого, электронные спектры могут быть использованы для проведения количественного анализа элементов и функциональных групп. Для этого используют соотношение:

$$\frac{n_i}{n_k} = \frac{\frac{I_i}{G_i}}{\frac{I_k}{G_k}},$$

где  $n$  – концентрация атомов;  $I$  – интенсивность линии спектра;  $G$  – сечение фотоионизации;  $i, k$  – виды атомов.

Однако необходимо учитывать, что ошибка количественного анализа электронных методов может достигать 20 %.

**Колебательная спектроскопия.** Воздействие монохроматического излучения на материал может приводить к упругому или неупругому рассеянию фотонов. Измерением спектральных характеристик упруго рассеянных фотонов занимаются *инфракрасная спектроскопия* (ИКС) или *ультрафиолетовая спектроскопия* (УФС) в зависимости от частотного диапазона воздействующего излучения. Метод измерения спектральных характеристик не упруго рассеянных фотонов (низкочастотных стоксовых колебаний) называют *романовской спектроскопией*, или *спектроскопией комбинационного рассеивания* (КР).

В основе ИК-метода колебательной спектроскопии лежит явление, состоящее в том, что различные атомные группы поглощают и отражают излучение строго индивидуальной частоты, которая называется характеристической для данной группы атомов. Если просканировать поверхность образца материала последовательно по всему диапазону частот, получим колебательный спектр, полосы в котором соответствуют определенным функциональным группам. Для идентификации материала используют каталоги характеристических спектров.

ИК-излучение обычно проникает в материал на глубину порядка длины волны; таким образом, вклад в спектр дают слои материала толщиной около 1 мкм и более.

Установление количественных характеристик по данным ИК-спектров затруднительно.

Эффект комбинационного рассеивания не обусловлен поглощением излучения, поэтому преимуществом КРС относительно ИКС является отсутствие требования о прозрачности материала, а также слабое поглощение КР-сигнала в водной среде и стекле. В общем случае методом КРС можно получить более полную информацию, чем при использовании ИКС.

**Масс-спектроскопия.** Процесс взаимодействия ионов различных энергий с поверхностью твердого тела изучают спектроскопия ионного рассеяния (СИР,  $E_a = 0,2-5$  кэВ) и вторичная ионная масс-спектроскопия (ВИМС,  $E_0 = 20$  кэВ). Когда первичный ион с энергией  $E_0$  и массой  $M_1$  зондирует поверхность, происходит его рассеяние на угол  $\theta$  поверхностным атомом с массой  $M_2$  (рис. 4.45). При этом анализируется энергия  $E$  рассеянных на угол  $\theta$  ионов.

Энергия  $E$ , как при столкновении упругих шаров, определяется массами сталкивающихся частиц  $M_1$  и  $M_2$ . Поэтому идентификацию элементного состава поверхности можно произвести на основе расчета массы атома мишени  $M_2$ , используя формулу

$$\frac{E}{E_0} = \left[ \frac{\cos \theta + \sqrt{\alpha^2 - \sin^2 \theta}}{\alpha + 1} \right], \quad (4.17)$$

где  $\alpha = \frac{M_2}{M_1}$ .

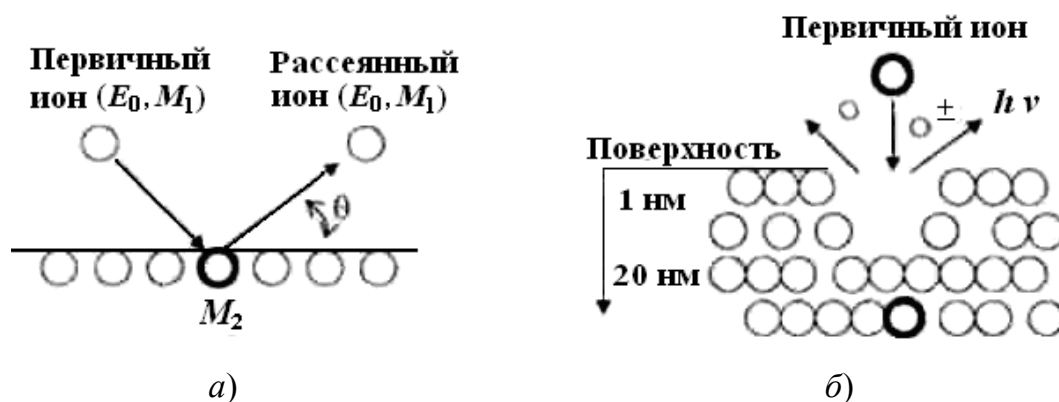


Рис. 4.45. Процессы, лежащие в основе масс-спектропии: а – спектроскопия ионного рассеяния; б – вторичная ионная масс-спектропия



В качестве бомбардирующих применяются ионы инертных газов (He, Ne, Ar).

Спектроскопия ионного рассеяния (СИР) обладает наиболее высокой поверхностной чувствительностью по сравнению с другими спектроскопическими методами, так как в процессе отражения низкоэнергетического иона ( $E_0 = 0,2-5$  кэВ) участвуют только атомы самого первого слоя. Глубину исследования можно повысить до трех монослоев, повышая энергию воздействия  $E_0$  до 20 кэВ (ВИМС). При этом наблюдается эффект, связанный с перемещением или распылением поверхностных атомов в виде заряженных или нейтральных частиц, молекулярных кластеров, а также с выбросом фотонов или электронов. Метод ВИМС является единственным методом анализа поверхности материалов, чувствительным к водороду и позволяющим различать изотопы элементов. Недостаток метода в сильной чувствительности метода от вида анализируемого элемента.

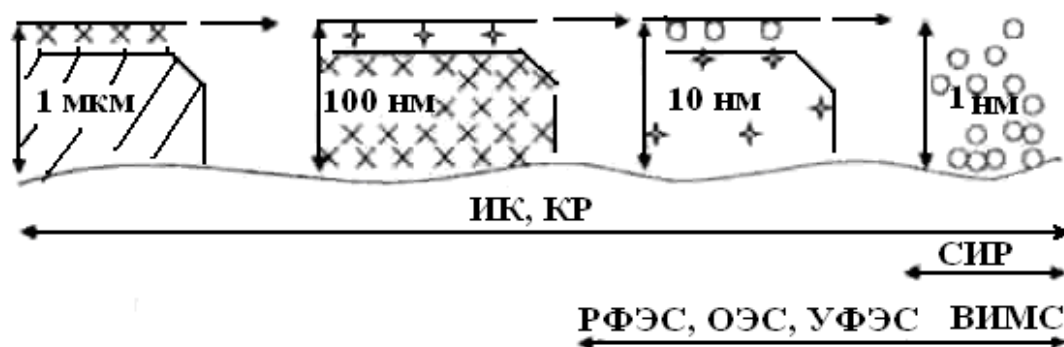


Рис. 4.46. Глубина профилирования материалов при использовании различных спектроскопических методов

Сравнение описанных выше методов по глубине профилирования представлено на рис. 4.46.

## 5. ИННОВАЦИИ И ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС

### 5.1. Сущность и содержание понятия «инновация»

Инновация – созданные и практически использованные (доведенные до потребителя) новые или усовершенствованные виды продукции, технологий или услуг, а также организационные решения административного, производственного, коммерческого или иного характера, обеспечивающие экономический эффект (социальный, экологический или иной эффект).

Равнозначным понятию «инновация» является понятие «нововведение». Но иногда понятие «инновация» ошибочно отождествляют с понятием «новшество», что не одно и то же. Новшество – научное знание, обладающее новизной и существенными отличиями по сравнению с существующими знаниями; результат научных исследований, технических разработок, опытных работ, оформленных документально (открытие, изобретение, ноу-хау, техническая документация на новый или усовершенствованный продукт, стандарт и др.) или представленных в вещественном виде (макет, опытный или экспериментальный образец). Новшество превращается в инновацию лишь после того, как оно доводится до потребителя, находит практическое применение. Типичными примерами новшеств являются опытные образцы новой продукции, в ходе создания которых изучаются и совершенствуются свойства и технологии изготовления новой продукции, определяются возможности ее производства.

Разработке новшеств обычно предшествует разработка инновационных идей, представляющих совокупность знаний об основных свойствах и принципах создания инновации (новых видов продукции или технологий), в том числе формулировка понятий, построение теорий, экспериментирование, классификация и обобщение полученных результатов, обработка и усвоение информации. Можно сказать, что инновационные идеи представляют собой прообразы новшеств, которые превращаются в новшества в результате материализации (например, создание образца изделия по его чертежам).

Новую продукцию и новые технологии рассматривают как два различных типа инноваций, именуемых, соответственно, продукто-

выми и процессными инновациями. Продуктовая инновация связана с созданием и практическим использованием новых или усовершенствованных видов продукции. Процессная инновация связана с созданием и практическим использованием новых или усовершенствованных видов технологий (технологических процессов). Следует, однако, заметить, что термин «процессные инновации» более правильно относить не к новым технологиям вообще, а к новым технологическим процессам как одной из составляющих технологий, поскольку другая составляющая – новые технологические средства, т. е. оборудование, оснастка, инструмент фактически являются продуктовыми инновациями. С учетом сделанного замечания новые технологии следует именовать технологическими инновациями. Продуктовые инновации иначе принято называть инновационной продукцией. Аналогично технологические инновации иначе можно называть инновационными технологиями. Технологические инновации часто служат базой для создания продуктовых инноваций. Действительно, производство многих видов новой продукции просто невозможно без использования новых технологий.

Инновации классифицируют по различным признакам: уровень новизны (радикальные, ординарные), масштаб новизны (новые в мире, новые в стране, новые в отрасли и т. д.), сфера использования (в сфере науки, в социальной сфере, в сфере производства), масштаб использования (трансконтинентальный, транснациональный, национальный, региональный, в масштабах фирмы), тип эффекта использования (обеспечивающие научно-технический эффект, обеспечивающие экономический эффект, обеспечивающие социальный эффект, обеспечивающие экологический эффект, обеспечивающие интегральный эффект). Важнейшей характеристикой инноваций является уровень новизны. Так, фирма, производящая инновационную продукцию, может получить существенный экономический эффект, если эта продукция является принципиально новой, предназначенной для удовлетворения ранее не удовлетворявшихся потребностей. Такая продукция, относящаяся к разряду радикальных (базовых) инноваций, как правило, обладает значительным коммерческим потенциалом, характеризуется высокой конкурентоспособностью и имеет большой спрос на рынках сбыта. К разряду радикальных инноваций также может быть отнесена продукция, которая является принципиально новой по сравнению с уже существующей. В этом случае новую продукцию можно рассматривать как принципиально новый заменитель традиционной продукции. Менее эффективной

в экономическом отношении является инновационная продукция, относящаяся к разряду ординарных (модифицирующих) инноваций. Это – обновленная продукция, которая обладает улучшенными или новыми дополнительными свойствами по сравнению с существующей, что позволяет расширить рынки ее сбыта.

**Место и роль инноваций в процессе развития.** В мире уже давно признано, что основное богатство любой страны основано на интеллектуальной собственности (ИС) – движущей силе развития общества, а в последние годы ее влияние стало определяющим как в экономически развитых странах, так и в странах с переходной экономикой. Индустрия ИС является лидером по объемам вклада в ВВП. Например, в Республике Беларусь ее доля составляет 7,6 %.

Состояние инновационной деятельности в любом государстве является важнейшим индикатором развития его экономики. Инновационная политика в развитых странах выступает составной частью государственной социально-экономической политики государства. Она позволяет перестраивать экономику, непрерывно обновлять техническую базу производства, выпускать конкурентоспособную продукцию, т. е. она направлена на создание благоприятного экономического климата и является связующим звеном между сферой «чистой» науки и задачами производства.

## **5.2. Виды технических задач и проблемы при их решении**

В процессе разработки нового устройства или способа обработки инженер решает различного рода задачи синтеза.

Если ввести условные обозначения:

- ИД (исходные данные) – понимаем как вещество, материал;
- А (алгоритм) – способ преобразования вещества в изделие (технология);
- Р (результат) – устройство, то все задачи синтеза можно представить в виде табл. 5.1.

Часто при решении задачи используют традиционный метод проб и ошибок (МПиО). Существенным недостатком этого метода является, во-первых, то, что каждая неудачная попытка мало приближает к цели, ибо, обнаруживая бесперспективность выбранного направления, она часто не позволяет определить, каким же способом и в каком направлении нужно искать решение.

Во-вторых, получив приемлемый результат, нельзя быть уверенным, что это наилучший из всех возможных.

В-третьих, решить задачу с ходу и при этом получить сильное решение часто мешает «вектор психологической инерции» (ВПИ).

Таблица 5.1

### Классификация технических задач

Номер	ИД	А	Р	Описание
1	+	+	+	Конструкторская задача (проектирование)
2	+	+	–	Задача получения новых устройств
3	+	–	+	Задача получения нового способа
4	–	+	+	Задача получения нового вещества
5	–	–	+	Задача создания новых материалов и способов их получения
6	+	–	–	Задача создания новых устройств и способов их получения
7	–	–	–	Поиск новых материалов, способ их получения и создание для этого новых устройств

Известная составляющая – знак «+», а неизвестная – знак «–».

*Психологическая инерция* – упорное стремление человека решать задачу традиционным, хорошо известным ему способом, искать решение в заранее выбранном направлении.

Всеми действиями человека руководит не только сознание, но и некоторые подсознательные установки, выработанные в процессе предыдущего опыта. Эти установки не осознаются человеком, но оказывают существенное влияние на способ принятия решений в любой момент времени.

Конструктор, встретившись с технической задачей, в поиске путей ее решения сначала опирается на свой опыт, на имеющиеся у него бессознательные установки, выработанные как в процессе обучения, так и практической деятельности. В стандартных ситуациях сложившиеся установки очень полезны, так как значительно экономят ресурсы при решении задачи, позволяя не раздумывать над каждым элементарным действием, выбором каждой шайбы, винтика или проводника и весьма часто позволяют принимать правильные решения. Однако эти же установки оказывают плохую услугу, когда нужно

найти качественно иное, новое решение задачи. Они по-прежнему подталкивают человека к использованию трафаретных, известных способов и средств. Человек при этом не осознает, что он действует под влиянием сложившихся ранее установок. Психологические установки часто приводят к выбору далеко не лучшего способа поиска решения, к усложнению процесса решения, увеличению времени и сил на решение задачи, сдерживают творческий поиск при решении задачи, способствуют получению плохого решения.

Одну из установок можно сформулировать следующим образом: *должно быть так..., а этого не может быть, потому что...* и далее, как правило, приводится обоснование, почему этого не может быть, например, ошибочности или бесполезности рассматриваемой идеи, невозможности ее реализации [8].

В конце XVIII в. Парижская академия специальным решением постановила не принимать сообщений «о камнях, падающих с неба» (метеоритах). В постановлении указывалось, что камни с неба падать не могут, ибо тверди небесной не существует. Выдающийся ученый А. Лавуазье тоже это подписал.

Французский астроном, физик и политический деятель Д. Араго выступал против сооружения железных дорог, и его поддержали многие английские коллеги, мотивируя тем, что при большой скорости колеса будут скользить по рельсам.

Французский астроном XIX в. Ж. Лаланд, немецкий изобретатель Э. Сименс полагали невозможным создание летательных аппаратов тяжелее воздуха. Г. Гельмгольц в 70-х гг. XIX в. пришел к выводу о бесперспективности полетов механических систем. Все они ссылались на законы природы.

Еще одна установка, оказывающая сильное влияние на принятие решений, может быть коротко сформулирована в следующем виде: *так считают авторитеты.*

Психологические установки: «*этот объект имеет ограниченное применение*», а также «*принцип работы объекта всегда был таковой*» также сильно мешают развитию технического прогресса.

В свое время одна только Парижская академия наук сумела объявить паром, изобретенный Р. Фултоном, утопией из-за установки на применение парусных судов, отвергнуть противоположную прививку Э. Дженнера, а Ф. Месмера, осуществившего первые опыты гипноза, заклеила как шарлатана.

Наполеон, который поддержал отказ академии по поводу первого парохода, позднее пожалел об этом. Будучи уже пленником англичан, он плыл в изгнание на остров Святой Елены на парусном судне, и их обогнал пароход. Тогда он сказал: «Прогнав Фултона, я потерял корону».

В начале XIX в. английские научные круги и Парижская академия медицинских наук оказывали упорное сопротивление внедрению наркоза в практику врачевания. Английский врач Г. Гикмер безуспешно просил разрешения применить для обезболивания при операциях закись азота, которую он испытал на животных и на себе. Более 40 лет добивались передовые врачи ряда стран права использовать наркоз в медицине. В России Н. Пирогов тоже встретил немалые препятствия применению наркоза в хирургии.

В свое время Лондонское Королевское общество, выполняющее, по существу, функции Английской академии наук, неприязненно встретило первые сведения об эволюционном учении Ч. Дарвина; провозгласило бесполезным изобретение лампочки Т. Эдисона; отклонило как нелепое сообщение о состоявшейся уже проверке эффективности громоотвода.

Даже через 100 лет после выхода основного труда Н. Коперника «Об обращении земных сфер» гелиоцентрическая система все еще не была включена в курсы астрономии западноевропейских университетов. Преподавалась геоцентрическая модель по Птолемею.

Известен такой афоризм: «Все знают, что это невозможно. Но приходит один чудака, который этого не знает, и делает открытие». Этот чудака – специалист в другой предметной области, а в этой – он дилетант. Он не отягощен тем самым ВПИ, который мешает специалисту подойти нетрадиционно к проблеме и найти оригинальное ее решение.

Итальянский радиотехник и предприниматель Г. Маркони, вслед за русским физиком А. Поповым, осуществил передачу радиосигнала. Он провел серию опытов по передаче и приему радиосигналов на большие расстояния. Он считал, что при достаточно мощном передатчике и чувствительном приемнике можно осуществить передачу сигнала через Атлантический океан.

Против Г. Маркони выступили специалисты. Всем известно, что радиоволны распространяются прямолинейно. Поэтому они не смогут обогнуть Землю. Г. Маркони просто отмахнулся от них. И ему удалось в 1897 г. осуществить свою идею.

Если бы Г. Маркони фундаментально знал законы распространения радиоволн, он не ставил бы перед собой такую задачу. В то время никто не догадывался о существовании особого слоя атмосферы – ионосферы, которая отражает волны.

### **5.2.1. Метод преобразования условий задачи**

Условия задачи состоят из описания исходных данных (ИД) и задания – что нужно сделать. Наиболее часто преобразование условий задачи заключается в замене словесной формулировки задачи некоторой моделью (например, в виде схемы, таблицы и др.), позволяющей выделить существенные векторы, которые могут быть использованы для достижения желаемого результата [9].

**Пример 1.** *Изменение формы предметов, описанных в ИД.* Как измерить обычной линейкой диаметр тонкой проволоки?

Прием – изменить форму объекта. Надо плотно намотать проволоку на оправку и измерить ее диаметр.

**Пример 2.** *Необходимо сделать отверстие в тонкой панели.* Если исполнитель ставит перед собой задачу *просверлить* отверстие, то он и будет думать, какое сверло выбрать и как сверлить. Если ставится задача *сделать отверстие*, то сверление будет рассматриваться как один из вариантов, наряду с другими возможными видами обработки, например, пробить отверстие, прожечь, использовать электрофизические и электрохимические способы.

Еще Паскаль предлагал *заменить термины их определениями*. Этот прием получил название *возвращение к определениям*. Заменяя термины определениями, решающий задачу раскрывает их содержание, освобождаясь тем самым от давления специальных терминов. При этом в определениях стараются раскрыть такие свойства рассматриваемых объектов, которые позволили бы связать свойства объектов, описанных в ИД, и требуемого результата.

Многие понятия (термины) могут иметь несколько определений, в которых раскрываются существенные свойства определяемых объектов. Это дает возможность рассмотреть задачу в различных аспектах, один из которых позволит найти способ ее решения.

### **5.2.2. Анализ противоречий при решении технических задач**

Решение любой технической задачи начинается с анализа проблемы. Результатом этого анализа является постановка и формули-



ровка задачи, которую нужно решать. В проблеме обычно описывается необходимость создания некоторого ТО для удовлетворения определенной потребности, приводится соответствующая аргументация этой необходимости, описываются функции, которые должен выполнять этот ТО; требования которые к нему предъявляются.

Если есть потребность в создании продукции с определенными потребительскими свойствами, но неизвестно, как ее удовлетворить, то возникает проблемная ситуация (ПС).

Описание ПС – это, с одной стороны, формулирование потребностей, функций, которые нужно выполнить, и, с другой стороны, описание тех факторов, которые мешают удовлетворить эти потребности или реализовать функции.

Проблемная ситуация может заключаться также в том, что намеченный способ достижения цели (например, реализации требуемой функции) или найденные ресурсы приводят к появлению таких нежелательных эффектов (НЭ), факторов расплаты, которые недопустимы.

**Техническое противоречие.** В проектно-конструкторских и технологических задачах обнаруживается противоречивость многих свойств, например, точность и производительность в технологии обработки материалов; масса, надежность и стоимость; устойчивость и управляемость ТО и др. В технологии производства мероприятия, направленные на повышение производительности обработки, часто приводят к ухудшению качества продукции. Если один из двух вариантов технологии при лучшем качестве позволяет обеспечить и большую производительность, то он вытесняет второй вариант; в этом случае проблемной ситуации нет [8].

Проблемная ситуация, которая сводится к тому, что действия, направленные на улучшение одного свойства ТС, приводят к ухудшению другого важного свойства, можно назвать *техническим противоречием* (ТП), так как оно соответствует операционному стилю мышления.

Таким образом, операционное противоречие (ОП) описывает ситуацию, когда изменение некоторого параметра  $X$  приводит к появлению положительного эффекта, которое ведет к улучшению одного потребительского свойства, но это сопровождается появлением и НЭ, обуславливающих ухудшение другого потребительского свойства.

**Пример 3. Набор инструментов слесаря.** Увеличение числа инструментов (параметр  $X$ ) в слесарном наборе улучшает возможности дифференцированного воздействия на изделие, но ухудшает условия

работы с набором, который становится более громоздким, тяжелым, следовательно, его неудобно переносить.

**Пример 4. Повышение производительности токарной обработки.** Анализ доступных ресурсов позволяет наметить два мероприятия (табл. 5.2). Однако они будут приводить к появлению НЭ, связанных, с одной стороны, с увеличением затрат и, с другой стороны, с ухудшением качества получаемой детали.

Таблица 5.2

**Пример появления НЭ от предложений по повышению производительности токарной обработки**

Мероприятия	Нежелательные эффекты	
	Качество детали	Экономические
Увеличить скорость главного движения	Увеличится температура заготовки и технологической системы. Могут произойти структурные изменения в материале заготовки	Повысятся затраты на инструмент и наладку оборудования
Увеличить подачу инструмента ( $S_0$ )	Увеличится шероховатость обработанной поверхности	Повысятся затраты на дополнительную операцию (шлифование)

В табл. 5.2 просматриваются следующие технические противоречия:

ТП<sub>1</sub>. Для повышения производительности труда нужно увеличить скорость резания. Но при этом увеличится температура резца. Период стойкости инструмента уменьшается и, следовательно, увеличиваются затраты на обработку.

ТП<sub>2</sub>. Для повышения производительности труда нужно увеличить скорость резания. Но при этом увеличивается температура заготовки. В материале заготовки будут происходить структурные изменения и, следовательно, снизится качество детали.

ТП<sub>3</sub>. Для повышения производительности труда нужно увеличить подачу инструмента. Но при этом увеличится шероховатость поверхности и, следовательно, снизится качество детали.

Применение оператора отрицания позволяет определить область поиска возможных решений, сформулировать частные задачи (рис. 5.1, табл. 5.3).

**Предметное противоречие** (ПП) – представляет собой два модальных нормативных суждения, которые являются несовместимыми.



Рис. 5.1. Схема построения цепочки причинно-следственных связей и постановка локальных задач с применением оператора отрицания

При формулировке ПП нужно раскрыть природу конфликта, объяснить, *почему* требования, отраженные в постановке задачи, являются противоречивыми и *для чего* нужно удовлетворить обоим противоречивым требованиям. Эти «почему» и «для чего» отражаются в нормативной части модального суждения.

Таблица 5.3

#### Перечень частных технических задач

Частные задачи	Возможные решения
Как увеличить производительность, не увеличивая скорость резания?	Применить несколько одновременно работающих резцов
Как сделать так, чтобы при увеличении скорости резания температура резца и заготовки не увеличивалась?	Применить смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ)
Как при увеличении температуры резца сделать так, чтобы его стойкость не уменьшалась?	Изменить материал режущей части инструмента

Частные задачи	Возможные решения
Как увеличить производительность, не увеличивая подачи?	Применить несколько одновременно работающих резцов
Как сделать так, чтобы при увеличении подачи шероховатость поверхности не увеличилась?	Применить резец формообразующий по схеме следа

<Субъект суждения ( $S$ )> должен иметь (нормативная модальность) <предикат (свойство,  $P$ )> для того, чтобы была <нормативная система ( $NC$ )>.

Свойства  $P$  и не- $\bar{P}$  характеризуют субъект суждения на качественном уровне, например скорость: большая и маленькая; материал: прочный и пластичный; электрический ток: постоянный и переменный и т. д.

Если рассматривать ПП как конфликт нормативных систем, то можно наметить три варианта дальнейших действий:

1) признать одну из нормативных систем более сильной и поступиться другой. Тогда противоречия не будет. Однако это не означает, что ПП было разрешено, проблема осталась. Отказаться от одной из нормативных систем – это отказаться решать задачу!

Естественно, что поступиться можно той нормативной системой, в которой сформулированы требования, предъявляемые человеком, а не той, в которой отражаются требования, диктуемые законами природы;

2) можно попытаться найти компромиссное решение, в котором требования, сформулированные в нормативных системах, будут удовлетворены лишь частично. К этому приему можно отнести решение задач оптимизации, в которых формулируется критерий и определяются оптимизируемые параметры. Критерий оптимизации отражает требования вышестоящей системы;

3) изменить характер взаимодействия ТО с НС таким образом, чтобы отпала необходимость в одной из нормативных систем. Например, передать функцию, которая порождает противоречие, другому компоненту ТО или в НС.

• **Разделение противоречащих свойств во времени.** Смысл этого приема заключается в том, что при функционировании объекта в одни промежутки времени проявляется одно свойство, например  $P$ , а в другие промежутки времени – другое противоположное свойство не- $\bar{P}$ .

Поскольку субъекты суждения разделены во времени, то в формулировке ПП они представляют собой разные понятия. Следовательно, высказывания, составляющие ПП, становятся несравнимыми и перестают быть противоречащими.

Практическая реализация этого приема часто сводится к введению в систему вещества на определенное время. Это вещество должно обеспечить получение нужного свойства в заданный период времени, а когда оно выполнит свою функцию, оно должно пропасть. Вместе с ним исчезнет и то свойство, которое оно породило.

**Пример 5.** *Способ определения площадок контакта поверхностей.* В промышленности распространен способ определения площадок контакта поверхностей при помощи растертых на минеральных маслах красок. Краску наносят на одну поверхность, затем эту поверхность вводят в соприкосновение с другой поверхностью. По распределению пятен краски на второй поверхности судят о качестве контакта. Слой краски составляет порядка 5...6 мкм. Для более точного определения зоны контакта поверхностей необходимо применение тонкого слоя краски.

ОП. При уменьшении толщины краски повышается точность контроля, но ухудшается индикация (обнаружение) результата.

ПП. Слой краски должен быть тонким для *повышения точности*, и он должен быть толстым для *обнаружения*.

Здесь можно воспользоваться известным приемом переформулирования условий задачи, – заменить некоторые термины, желательно, более общими, расширить область поиска возможных решений. В частности, во второй части ПП мысль: «*толстым для обнаружения*» заменить «*контрастным для обнаружения*».

ПП. Слой краски должен быть тонким для *повышения точности*, и он должен быть контрастным для *обнаружения*.

Это будет более общая и более точная формулировка, так как толстый слой нужен для контрастности.

Следует подчеркнуть, что свойства *тонкий* и *контрастный* характеризуют различные качественные стороны субъекта суждения, т. е. это противоречие имеет физическое основание.

Из формулировки ПП видно, что в рассматриваемом технологическом процессе можно выделить два этапа: *испытание* – приведение площадок в соприкосновение и *контроль* – момент обнаружения границ пятен краски, т. е. нормативные системы «подсказывают», что рассматриваемые свойства должны проявляться в разные моменты времени. Следовательно, ПП можно разрешить во времени.

Естественно, возникает вопрос: Какие вещества и (или) поля можно ввести в технологический процесс, чтобы разрешить это противоречие во времени? Теперь можно наметить путь решения задачи. Слой краски – тонкий (малоконтрастный) в момент испытания, при контроле становится контрастным.

Задача сводится к поиску ресурсов. Какие вещества и поля можно ввести в систему, т. е. какие физико-технические эффекты (ФТЭ) можно использовать для того, чтобы тонкий слой краски был хорошо виден. После испытаний перед процессом контроля можно ввести вещество, которое вступит в химическую реакцию с нанесенным слоем краски, или ввести в краску люминофор и применить ультрафиолетовое облучение и др.

Складывающиеся устройства: нож, зонтик, телескопический защитный кожух – были разработаны потому, что нужно было разрешить ПП. Все эти ТО должны обладать разными свойствами в различные моменты времени.

Например, шариковая ручка должна оставлять след на бумаге, но не должна оставлять след на одежде, – не пачкать карман. *Противоречие разрешается во времени либо введением еще одного вещества (шариковая ручка с колпачком), либо за счет динамизации (убирающийся стержень).*

• **Разделение противоречащих свойств в пространстве.** Практическая реализация этого приема заключается в том, чтобы разнести в пространстве противоречащие свойства, которыми должен обладать рассматриваемый объект.

**Пример 6. Закалка стальной детали.** Известно, что для того, чтобы стальная деталь обладала хорошей износостойкостью, нужно, чтобы она имела высокую твердость. Это достигается применением термически упрочняемого материала и термической обработкой – закалкой. Но в таком состоянии материал, как правило, имеет низкую ударную вязкость, т. е. подвержен хрупкому разрушению при ударных нагрузках.

В хрупком материале возникшая трещина развивается практически мгновенно, а в вязком материале происходит медленное разрушение при значительной пластической деформации. При ударных нагрузках вязкий материал деформируется, а хрупкий ломается. В работающей машине процесс развития пластической деформации можно обнаружить по изменению характера ее работы. Поэтому высокая ударная вязкость материала конструкции является одним из способов обеспечения безопасности при эксплуатации техники.

В этой задаче ПП заключается в том, что материал стальной детали должен быть твердым *для высокой износостойкости*. И он должен быть пластичным, *чтобы не было внезапного хрупкого разрушения*.

Свойства *твердость* и *пластичность* характеризуют различные качественные стороны материала, но они находятся в отношении противоположности. Для стальной детали они несовместимы по физическому основанию, противоречат объективным законам природы.

Из анализа нормативных систем следует, что твердость нужна для износостойкости, т. е. только в поверхностном слое. Нормативные системы в формулировке этого ПП сами «подсказывают», что его можно разрешить разделением требуемых свойств в пространстве – твердой деталь должна быть только в поверхностном слое.

Для этого деталь изготавливается из материала, который не упрочняется термической обработкой (малое содержание углерода), а поверхностный слой цементируется (насыщается углеродом) и производится термообработка – закалка.

Высказывания в ПП перестают быть противоречащими, так как теперь в них разные субъекты. Теперь уже *одна часть* рассматриваемого объекта обладает свойством ( $P$ ), а *другая* – противоположным свойством ( $\text{не-}\bar{P}$ ).

Этот прием можно трактовать так же, как использование *принципа местного качества*, т. е. создать нужное свойство только там, где это действительно необходимо.

Закалка сталей основана на том, что при охлаждении по достижении определенной температуры происходит изменение кристаллической решетки железа. При этом изменяется растворимость углерода в железе (сталь – твердый раствор углерода в железе). Но здесь применен еще один прием – количественные изменения. При быстром охлаждении фиксируются те структуры, которые устойчивы при высокой температуре. В результате повышается прочность материала и снижается его пластичность.

Для разрешения ПП в пространстве можно либо использовать свободное (пустое) пространство в ТО, либо ввести в систему вещество-разделитель.

Следует отметить, что формулировка ПП – *это модель задачи*. Эта модель дает возможность выявить *оперативную зону* и *оперативное время*.

*Оперативная зона* (ОЗ) – пространство, в пределах которого возникает конфликт.

*Оперативное время (ОВ)* – момент времени, когда конфликт возникает, а также время до появления конфликта, когда в ТО происходят процессы, подготавливающие этот конфликт.

**Пример 7. Размерная химическая обработка.** Для получения рельефной поверхности на крупногабаритных оболочках, например, для образования усилений в местах стыковой сварки (например, на днищах топливных баков), для получения вафельного силового набора на обечайках топливных баков (зоны *A* на рис. 5.2), применяется операция избирательного размерного химического травления.

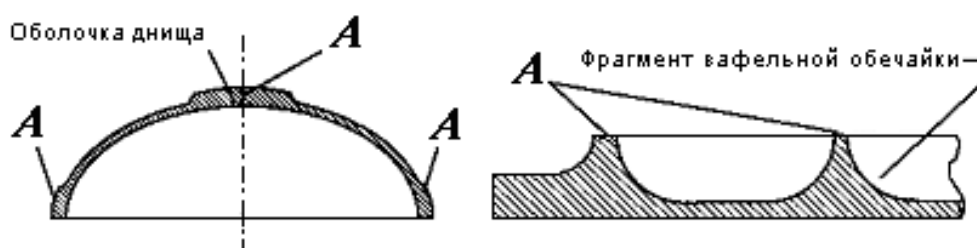


Рис. 5.2. Конструкции, подвергаемые избирательному химическому травлению

Излишки материала удаляются в щелочных растворах. Поверхности, которые не должны подвергаться травлению, покрываются лаком.

Проблемная ситуация состоит в том, что необходимо очень точно нанести защитный лак на участки, которые не должны подвергаться травлению. Лак должен иметь хорошую адгезию к металлу, чтобы в процессе обработки не было подтравливания материала под покрытием.

Если лак наносить по трафарету, то не удастся получить точный контур. Поэтому было принято решение наносить лак на всю поверхность, а затем по шаблону чертилкой делать разметку – надрезать покрытие и скальпелем удалить лак с тех участков, которые должны подвергнуться химической обработке.

Однако это решение привело к следующей проблеме. Защитное покрытие должно иметь хорошую адгезию к металлу для того, чтобы не было подтравливания материала в процессе химической обработки и можно было бы получить точный контур, и покрытие должно иметь слабую (плохую) адгезию, чтобы после нанесения покрытия и его разметки можно было бы легко удалить часть покрытия (в местах, где должно происходить травление).

III. Лак должен иметь хорошую адгезию, чтобы не было подтравливания. И лак должен иметь плохую адгезию, чтобы его можно было легко удалить с участков, подлежащих травлению.



Требования к связи между веществами (деталью и покрытием) находятся в противоречии: адгезия хорошая и плохая. Из нормативной части суждений, составляющих ПП, видно, что требования, предъявляемые к связи, относятся к разным моментам времени.

Противоречие можно разрешить введением еще одного вещества. Технологический процесс выполняется по следующей схеме:

- 1) нанесение временного покрытия с плохой адгезией;
- 2) разметка;
- 3) удаление временного покрытия с участков, которые не должны подвергнуться травлению;
- 4) нанесение постоянного покрытия с хорошей адгезией в основном на участки, которые нужно защитить от травления;
- 5) удаление постоянного и временного покрытия с участков, подлежащих травлению.

*Пример 8. Как стабилизировать период колебания маятника.*

ПП. Период колебания маятника должен быть постоянным, и он должен быть переменным, так как при изменении температуры изменяется длина маятника. Стержень металлический, и при изменении температуры изменяется его длина.

ОВ. Время функционирования объекта, когда происходит изменение температуры.

ОЗ. Точка подвеса, стержень, точка расположения центра масс груза.

Понимание физических законов, которые описывают поведение ТС, позволяет наметить пути решения задачи.

Период колебания маятника зависит от длины стержня и силы тяжести:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}},$$

где  $L$  – длина маятника,  $g$  – ускорение силы тяжести.

Естественно, возникает задача, как управлять этими параметрами. При этом надо стремиться к получению идеального технического решения, т. е. ТО должен управлять сам собой.

Здесь следует отметить еще одно важное обстоятельство. Операционные и предметные противоречия часто возникают именно после формулировки идеального текущего результата (ИТР) (идеального конечного результата – ИКР), так как идеальный вариант недостижим.

В рассматриваемом примере объект *должен сам управлять* своими параметрами, но он не может этого сделать, так как у него нет для этого ресурсов. Это тоже можно рассматривать как ПП. Ориентировку в поиске ресурсов дает представление об ОЗ, ОВ и компонентах надсистемы, с которыми связан рассматриваемый ТО.

Теперь задача формулируется следующим образом: нужно устройство, которое хорошо бы реагировало на изменение температуры, т. е. не изменяло длину маятника или изменяло силу притяжения груза при изменении длины маятника. Ставятся задачи: какие вещества и поля можно ввести в систему? Какими свойствами они должны обладать?

Задача решается привлечением вещественно-полевых ресурсов: использование веществ с различными коэффициентами линейного термического расширения. С увеличением температуры будет увеличиваться длина маятника. Это приведет к увеличению периода колебаний. При этом будет уменьшаться зазор между маятником и магнитом, что приведет к увеличению силы притяжения маятника.

### **5.3. Алгоритм решения задач с анализом противоречий**

Для некоторых видов технических задач можно предложить следующие основные этапы решения задачи.

1. Какая конечная цель, для которой ставится задача?

Варианты постановки задачи:

1.1) не допустить появление НЭ;

1.2) избавиться от имеющегося НЭ.

2. Что желательно получить в идеальном ТО?

Сформулировать ИКР:

2.1) заменить технические термины функциональными; сформулировать цель, используя утвердительную форму со словами: «Само собой ...», «Без ничего ...»;

2.2) не думать, как получить ИКР!

3. Что мешает получению ИКР? В чем помеха?

Примерная формулировка: «Само собой, без ничего – не получается, реально существует нежелательное действие, помеха, а это недопустимо».

4. В чем заключается причина помехи?

Вникнуть в суть происходящих процессов и явлений, понять происхождение требований.

5. Сформулировать противоречия (ТП или ПП).

6. Проверить ход решения задачи.

Если противоречие будет разрешено, то поставленная цель (см. п. 1) будет достигнута? Если ответ отрицательный, то вернуться к п. 2.

Для разрешения противоречий можно предложить следующие методические рекомендации.

1. Сформулировать операционные противоречия:

1.1) попытаться упразднить функцию, порождающую ТП. Для этого изменить характер взаимодействия ТО с надсистемой таким образом, чтобы функция была не нужна или передать функцию другому компоненту технической системы, или в надсистему;

1.2) изменить техническую функцию – поставить другую цель выполнения физической операции рассматриваемым функциональным компонентом;

1.3) изменить физический принцип действия (ФПД) физической операции, содержащей противоречие. Перейти на другой ФПД, ориентируясь на закономерности развития технических систем.

2. Выявить и сформулировать ПП. Для этого построить цепочку причинно-следственных связей, в которой создание положительного эффекта приводит к появлению НЭ.

3. Рассмотреть разрешение ПП с позиции конфликта нормативных систем:

3.1) проанализировать, можно ли изменить одну из нормативных систем за счет изменения характера взаимодействия рассматриваемого ТО с надсистемой таким образом, чтобы упразднилось требование, отраженное в одной из нормативных систем. Найти вышестоящую по иерархии нормативную систему и, сформулировав критерий, найти оптимальное решение;

3.2) изменить нормативную систему, поставив другую цель функционирования рассматриваемого компонента. Сформулировать другую ТФ – цель выполняемой физической операции. Например, не контролировать, а регулировать.

Рассмотреть возможность применения другой физической операции (ФО). Например, измерять не тот параметр, который задан в условии задачи, а другой.

4. Рассмотреть разрешение ПП с позиции конфликта свойств:

4.1) проанализировать нормативные системы и наметить прием разрешения ПП;

4.2) выбрать изменяемый компонент, выделить ОЗ и определить ОВ для сформулированных противоречий. Осуществить поиск вещественно-полевых ресурсов;

4.3) разрешить противоречие приемами, направленными на изменение системных свойств ТО.

## **5.4. Структурный анализ технических объектов**

Под термином *технический объект* понимается созданное (или создаваемое) человеком техническое устройство, предназначенное для удовлетворения определенных потребностей.

Создается ТО для удовлетворения определенных потребностей. Совокупность функций, которые отражают назначение ТО, цель его создания, и определяют его потребительские свойства, принято называть *главной полезной функцией* (ГПФ).

Основой функционирования любого ТО являются ФТЭ, которые используются для формирования ФПД ТО.

Технические функции (ТФ) совместно с описанием конструктивно-схемного решения составляют *техническое решение* (ТР). Техническое решение, воплощенное в конкретном конструкторско-технологическом решении (КТР), отражается в чертеже конструкции проектируемого ТО.

Основной смысл построения модели *черного ящика* – изучить взаимодействие объекта с надсистемой, внешней средой, в которую входит рассматриваемый объект как компонент, и понять, какие управляющие сигналы должны поступать на вход объекта и в какие выходные сигналы они должны преобразоваться.

### **5.4.1. Генетический подход**

К созданию технического устройства часто приводило то, что человек искал применение открытому физическому эффекту. Например, открытие закона Ома привело к созданию лампочки накаливания для получения света; кавитации – к созданию ультразвуковой отмычки деталей; фазовых переходов – к разработке систем охлаждения; пьезоэффекта – к созданию датчиков вибраций, излучателей звука, вибростендов, пьезотрансформаторов.

Получив практический результат, человек совершенствует рабочий орган (РО), стараясь сделать его более удобным в использовании.

К РО добавляются передаточные элементы (ПЭ) – трансмиссии (Тр), разрабатываются органы управления (ОУ). Зона действия РО отделяется из трех частей ТС, которые непосредственно взаимодействуют с человеком.

*Основные компоненты* непосредственно участвуют в формировании ГПФ: РО, Тр, ПЭ, УО.

*Вспомогательные компоненты* обеспечивают работу основных функциональных компонентов (амортизаторы, виброгасящие устройства).

*Дополнительные* добавляют удобства для работы и обслуживания (защитные устройства, предохранители, экраны, рассекатели, стружколоматели и т. д.).

#### **5.4.2. Структурный подход**

Граф несет информацию о связях в объекте, удобную для восприятия человеком. Для обработки этой информации в ЭВМ его можно представить в виде булевых матриц.

Для описания структуры объектов используют различные виды моделей в виде графа:

– корпускулярная – состоит из дисперсных слабо связанных между собой элементов. Основное свойство такой структуры – потеря небольшого числа элементов практически не изменяет свойства системы. Например, песчаный фильтр, камни в галтовочном барабане;

– цепная – характеризуется линейной структурой однотипных (однородных) компонентов или мало отличающихся друг от друга повторяющихся компонентов. Например, велосипедная цепь, железнодорожный состав, цепочки, разомкнутые системы управления (без обратной связи), некоторые процессы, например, этапы проектирования;

– звездная – содержит центральный компонент, который связан со многими другими. Такая модель может быть использована для многоаспектного анализа проблем, для моделирования некоторых структур управления;

– сетевая – описывается планарным графом. Этот граф, который может быть изображен на плоскости таким образом, чтобы ребра, связывающие вершины, не пересекались. В этой модели число компонентов и связей примерно одинаково. На ее основе построены такие объекты, как телефонная сеть, односторонняя монтажная плата, некоторые базы данных;

– многосвязная – описывается непланарным графом, который нельзя изобразить на плоскости без пересечения ребер. В этой модели

связей больше, чем компонентов. Например, двухсторонняя монтажная плата, двух- и многоярусные дорожные развязки, сложные базы данных. Если компонентов много (больше 7–9), то модель становится трудно обозримой;

– иерархическая структура – модель, широко применяемая для описания классификаций объектов, а также для упрощения представления сложных объектов. Например, модели баз данных, временные процессы, в которых операции могут выполняться как последовательно, так и параллельно, например сетевой график.

Как отмечают психологи, одна единица информации может стать источником огромного количества ассоциаций, которые, в свою очередь, дают толчок к появлению множества новых. «Лучистое мышление», таким образом, – естественный процесс, отражающий работу мозга на уровне тонких механизмов, а майнд-Мэп является внешним графическим проявлением этой концепции.

При исследовании технологических проблем разрабатываются операционные ментальные карты, в которых отражаются функции и действия, необходимые для их выполнения.



Рис. 5.3. Классификация связей в ТО

В структурном анализе большое внимание уделяют связям между компонентами ТС. Связи в ТО можно выделять по различным признакам (рис. 5.3).

### 5.4.3. Метод функционального анализа объектов

Создание и выпуск изделий на уровне лучших мировых образцов требует углубленного изучения конструкции и структуры технических объектов, которые необходимо усовершенствовать [10]. При таком изучении в первую очередь необходимо понять и уточнить следующее:

– какие функции выполняет каждый элемент технического объекта и как элементы функционально связаны между собой;

– какие физические операции (преобразования) выполняет каждый элемент и как они взаимосвязаны;

– на основе каких физико-технических эффектов работает каждый элемент технического объекта и как они взаимосвязаны.

При выяснении этих вопросов появляется четкое и цельное представление об устройстве технического объекта, который требуется усовершенствовать, с функциональной и физической точек зрения. Без такого представления затруднительно заниматься поиском наиболее эффективного нового технического решения.

Техническим объектом называется созданное человеком или автоматом реально существующее (существовавшее) устройство, предназначенное для удовлетворения определенной потребности. К ТО также относится любой из элементов (агрегат, блок, узел, деталь), из которых состоят машины, аппараты и т. д., а также любой из комплексов взаимосвязанных машин, аппаратов, приборов. Это может быть технологическая линия, цех, завод и т. п.

Существует иерархическое соподчинение ТО различных уровней. Так, машины или станки являются элементами технологической линии или цеха. Станки состоят из узлов и деталей, т. е. почти у любого ТО существует надсистема (другой ТО), в которую он функционально включается или входит как отдельный элемент.

Любой ТО (кроме неделимых элементов) может быть разделен на несколько укрупненных функциональных элементов, каждый из которых должен иметь минимальное число (не менее одной) определенных функций. Такое разделение обычно соответствует установившемуся в инженерной практике конструктивному разделению на агрегаты, блоки, узлы, детали, части деталей и неделимые элементы.

*Узлом* ТО называется множество конструктивно связанных деталей, в совокупности выполняющих хотя бы одну функцию по обеспечению работы других элементов рассматриваемого ТО или самого ТО.

*Деталью* ТО называется отдельное тело из однородного материала, имеющее множество определенных форм и выполняющее хотя бы одну функцию по обеспечению работы других элементов ТО или самого ТО.

*Неделимым элементом* называется деталь (или часть детали) с минимальным числом функций (не менее одной) по обеспечению работы других элементов, при любом делении которой появляются элементы, не имеющие самостоятельной функции или с одинаковыми

функциями. Например, шарик в подшипнике, конусная заостренная часть гвоздя, жидкость в гидроцилиндре.

*Функция (потребность)* – это общепринятое и краткое описание на естественном языке назначения ТО или цели его создания (существования). Различие между потребностью и функцией состоит в том, что понятие потребность всегда связано с человеком или автоматом, поставившим задачу реализации потребности и выполняющим проектирование соответствующего ТО и его изготовление. Понятие функции ТО всегда связано с ТО, реализующим эту потребность. Описания функции ТО и потребности тождественны. В описании потребности пользуются отглагольным существительным, а функции – глаголом.

Описание функции ТО должно включать следующую информацию:

- действие, производимое рассматриваемым ТО и приводящее к желаемому результату;
- объект (объекты), на который направлено это действие;
- особые условия и ограничения, при которых выполняется действие.

Каждый ТО находится в определенном взаимодействии с окружающей средой (ОС). Для конкретного ТО в качестве ОС могут выступать его надсистемой объекты неживой и живой природы и другие ТО, которые находятся в функциональном или вынужденном взаимодействии с рассматриваемым и оказывают заметное влияние на его проектно-конструкторское решение.

Взаимодействие ТО и ОС может происходить по нескольким каналам связи, которые легко разделить на две группы. Первая группа включает потоки вещества, энергии и сигналов, передаваемые от окружающей среды к ТО: функционально обусловленные входные воздействия (входные потоки в физической операции); вынужденные входные воздействия (температура, влажность, пыль. Вторая группа – это потоки, которые передаются от рассматриваемого ТО окружающей среде: функционально обусловленные выходные воздействия (выходные потоки в физической операции); вынужденные выходные воздействия (загрязнение воды, земли и воздуха, токи СВЧ и т. д.). Элементы ТО имеют определенные функциональные связи друг с другом, которые образуют конструктивную функциональную структуру ТО. Она представляет собой ориентированный граф, вершинами которого являются наименования элементов, а ребрами – функции элементов.



Каждый элемент ТО или его конструктивный признак имеет хотя бы одну функцию по обеспечению реализации функции ТО, т. е. исключение элемента или признака приводит к ухудшению какого-либо показателя ТО или прекращению выполнения им своей функции. Совокупность всех таких соответствий в ТО представляет функциональную структуру в виде ориентированного графа, который отражает системную целостность ТО и соответствие между его функцией и структурой (конструкцией).

Главная суть гипотезы о законе соответствия структуры и функций ТО заключается в том, что в правильно спроектированном ТО каждый элемент, от сложных узлов до простых деталей, и каждый конструктивный признак имеют вполне определенную функцию (назначение) по обеспечению работы ТО. В связи с этим у правильно спроектированных ТО нет лишних деталей.

*Разделение ТО на элементы и описание их функций.* В основу анализа функций ТО и построения конструктивной функциональной структуры положен принцип выделения и рассмотрения структур с двухуровневой иерархией, т. е. любой ТО можно разделить на несколько элементов, каждый из которых имеет вполне определенную функцию (функции) по обеспечению работы ТО или его элементов. При этом рассматриваемый ТО представляет собой верхний уровень, а выделенные функциональные элементы – нижний.

Если требуется продолжить (углубить) анализ, то каждый из выделенных элементов нижнего уровня рассматривается как самостоятельный ТО, который также можно разделить на несколько функциональных элементов, и т. д. Объединение таких структур с двухуровневой иерархией позволяет получить многоуровневую иерархическую структуру. Но многоуровневые структуры получаются сложными и труднообозримыми, поэтому инженер при изучении, анализе и синтезе ТО обычно выделяет и рассматривает двухуровневые структуры, переходя по горизонтали или вертикали от одной структуры к другой.

Глубина многоуровневого разделения ТО на элементы обычно определяется характером решаемой проектно-конструкторской задачи или задачей изучения ТО. Предельное детальное разделение ТО возможно до неделимых (в функциональном смысле) элементов. Одновременно с разделением ТО на элементы выделяют объекты ОС, с которыми рассматриваемый ТО находится в функциональном или вынужденном взаимодействии и которые существенно влияют на конструкцию ТО. В первую очередь, к ОС относятся объекты, восприни-

мающие действие ТО. К объектам ОС также могут относиться подводимая энергия, управляющие сигналы, объекты, на которые действуют отработанные вещества, неблагоприятные излучения и другие воздействия, оказывающие существенное влияние на конструкцию ТО, и т. д.

Среди всех выделенных элементов ТО при проектно-конструкторских разработках особое внимание чаще всего уделяют главным элементам (или первичным, исходным элементам), которые можно выделить у большинства ТО. К главным элементам относят рабочие органы и другие элементы, которые непосредственно взаимодействуют с предметом обработки и другими объектами ОС. При выделении главных элементов и соответствующих им объектов ОС рекомендуется иметь в виду следующие свойства:

– функция главных элементов, как правило, совпадает с функцией ТО или в решающей мере зависит от функции ТО;

– объекты ОС для главных элементов, как правило, совпадают с объектами, на которые направлено действие ТО. Главным элементам присваивают обозначение  $E_0$  (если их несколько, то  $E_{01}, E_{02}, \dots, E_{0n}$ ). Остальным элементам первого уровня присваивают обозначения  $E_1, E_2, \dots, E_n$ .

Элементы второго уровня, полученные в результате разделения главных элементов первого уровня  $E_{01}, E_{02}$  и т. д., обозначают, соответственно,  $E_{0-1}, E_{0-2}, \dots$ . Элементы второго уровня, полученные в результате разделения любого элемента первого уровня  $E_{0-1}$ , обозначают соответственно. Функциональные элементы третьего и последующих уровней выделяются аналогично второму уровню. При этом в обозначениях элементов число номеров нижних индексов будет совпадать с номером уровня функциональных элементов. Например, для третьего уровня будем иметь  $E_{i-k-l}$ .

Объекты ОС, с которыми взаимодействует ТО и его элементы, обозначают через  $V_1, V_2, \dots, V_n$ .

При описании функций элементов целесообразно в скобках дублировать обозначения объектов ОС и элементов ТО, которые участвуют в описании функции. Сами функции элементов любого уровня обозначают буквами  $\Phi_0, \Phi_{01}, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_{0-1}, \Phi_{0-2}, \dots$  (индексы соответствуют индексам в обозначении соответствующего элемента). Если какой-либо элемент имеет несколько функций, то их, соответственно, обозначают через  $\Phi'_0, \Phi''_1, \Phi'_2, \Phi''_2$  и т. д.

Результаты разделения ТО на элементы и описания их функций оформляют в одной таблице анализа функций. Поскольку результаты разделения ТО на элементы и описания функций элементов оформ-

ляются в одной таблице, то их целесообразно выполнять одновременно. В таблице анализа функций на каждом уровне иерархии элементы нумеруют в таком порядке, чтобы по возможности при описании функций новых элементов делались ссылки на уже описанные. При составлении таблицы особое внимание нужно уделить наиболее правильной формулировке функций элементов как при описании их содержания, так и при отнесении их к определенным элементам.

Правильное (однозначное) разделение ТО на элементы и установление их функций является одной из самых важных и трудно формализуемых операций в анализе функций ТО. Поэтому в дополнение к изложенной методике полезно также руководствоваться следующим «правилом исключения». Суть этого правила состоит в том, что по отношению к рассматриваемому узлу или детали задается вопрос: если исключить этот узел (деталь), то какие отрицательные последствия появятся в работе других элементов или самого ТО? Действия по предотвращению выявленных таким образом отрицательных последствий обычно по содержанию представляют собой функцию рассматриваемого узла или детали.

#### ***5.4.4. Построение конструктивной функциональной структуры технического объекта***

Функциональная структура (ФС) представляет собой ориентированный граф функционального взаимодействия ее элементов и объектов окружающей среды (ОС). При построении ФС сначала изображают вершины графа. В самом верхнем горизонтальном ряду предпочтительно располагать вершины – объекты ОС; ниже, во втором ряду, располагают вершины – функциональные элементы первого уровня; в третьем ряду – вершины – элементы второго уровня и так далее до самого нижнего уровня функционального разделения ТО. В вершинах, представляющих собой овалы или прямоугольники, указывают обозначения и наименования объектов ОС и элементов (в соответствии с таблицей анализа функций ТО) или только обозначения объектов ОС и элементов ТО.

После этого строят направленные ребра графа. Ребра выходят из вершин – элементов, функции которых они описывают, и заканчиваются в вершинах – элементах, работу которых они обеспечивают, или в вершинах – объектах ОС, с которыми взаимодействуют вершины – элементы, являющиеся началом ребра. Вершины, в которых заканчиваются ребра-функции, указаны в описании функции (в скобках).

Граф ФС, как правило, имеет ребра двух типов. Первый тип – простые ребра, начинающиеся в одной вершине и заканчивающиеся в другой единственной вершине. Ребра второго типа описывают функции элементов, которые обеспечивают взаимодействие между другими несколькими элементами и объектами ОС. Такие ребра имеют один выход и несколько входов, соединенных между собой И-вершиной, т. е. они начинаются в одной вершине-элементе и через абстрактную И-вершину заканчиваются в двух и более вершинах-элементах (объектах ОС).

Всем ребрам на графе присваивают обозначения, совпадающие с обозначениями соответствующих функций элементов.

При построении графа имеет значение порядок расположения вершин-элементов в пределах одного уровня. Рекомендуется так располагать вершины, чтобы число пересечений ребер было минимальным.

В функциональной структуре ТО из-за частого совпадения функции ТО (или элемента) и их основных элементов нередки случаи тождественного совпадения функций элементов двух и более соседних уровней. При этом нижестоящие элементы являются результатом конструктивного деления вышестоящих. В таких случаях для упрощения графа и выделения элементов с одинаковыми функциями последние соединяют волнистой линией, на которой пишут тождество функций, например  $\Phi = \Phi_{0-1}$ . Но волнистую линию можно заменить и ребром-функцией (в указанном примере  $\Phi_{0-1}$ , которое будет заканчиваться в тех же вершинах, что и функция  $\Phi_0$ ). Если при тождестве функций у вышестоящего элемента всего одна функция, то тождество функций вдоль волнистой линии можно не указывать. Возможны и другие случаи тождественного совпадения функций элементов. Например, элементы соединения, у которых бывает симметрична одинаковая функция. В этих случаях функцию второго (по порядку следования) элемента также можно обозначить волнистой линией.

Главная полезная функция реализуется через РО, взаимодействующий с объектом, на который направлено его действие. Рабочий орган может выполнить свои функции, если к нему подводится энергия и управление, т. е. в общем случае рабочий орган может успешно функционировать, если его работу обеспечивают основные компоненты ТС: ПЭ, ОУ, Тр, которые выполняют *основные функции* (ОФ), разумеется, если в ТС нет, то их функцию выполняют компоненты НС.

К дополнительным функциям относятся: измерение параметров (температуры, давления, положения) для контроля протекающих процессов; обеспечение безопасности человека (защитные устройства); защита устройства от перегрузок (предохранители); предупреждение са-

моотвинчивания резьбовых соединений (например, шайбы Гровера); повышение устойчивости работы устройства (отрицательная обратная связь); обеспечение технологичности конструкции, обслуживания ТО, например, возможности подналадки и регулировки режимов работы устройства (подстроечные конденсаторы, технологические компенсаторы при выполнении сборочных работ, технологические стыки и разъемы); диагностика работы устройства (индикаторы).

**Формулирование функций.** Функция резца – резать твердый материал. Он может выполнять эту функцию, если обладает определенными свойствами, например, он острый и по своим размерам соответствует обрабатываемому объекту.

Электродвигатель – преобразует электрическую энергию в механическое движение; кронштейн – передает нагрузку от некоторого компонента на несущую часть конструкции, смазка снижает силу трения в подвижном соединении деталей, тензодатчик – преобразует деформацию конструкции в электрический сигнал.

<Действие> <Объект функции> <Обстоятельства>

<Действие> – глагол в неопределенной форме, прямого действия;

<Объект функции> – предмет, на который направлено действие;

<Обстоятельства> – пространственно-временная и вещественно-полевая характеристики условий, в которых должно выполняться действие.

*Действие* можно сформулировать двумя способами: либо применить глагол, либо использовать отглагольное существительное.

При использовании глагольной формы действие должно выражаться глаголом прямого действия, например, улучшить, исключить, добиться, обеспечить, предотвратить и т. д. не дают, как правило, четкости в формулировке задачи. Поэтому их употреблять не рекомендуется.

Форма с использованием отглагольного существительного описывает предназначение объекта и в ряде случаев оказывается более естественной.

В формулировке функции нельзя использовать наименования свойств, которые характеризуются несколькими простыми, например, *повысить надежность, экономичность, качество. Надежность* – это комплексный показатель, который характеризуется частными показателями: *долговечностью, безотказностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.*

Понятие «экономичность» очень широкое, его нужно раскрыть, например, экономическая эффективность, топливная эффективность.

В формулировке ГПФ нужно указывать *все необходимые* связанные функции. Например, клапан – *пропускать рабочую среду в одном направлении и не пропускать в другом*; подъемный кран – *поднимать и перемещать груз*; кондукторная втулка – *определять положение инструмента (сверла) относительно установочных баз приспособления и направлять его движение в процессе обработки*.

Если ТО должен выполнять несколько функций, то необходимо проверить, не находятся ли они в *отношении подчинения*. Просто подчиненная функция может быть выполнена только после того, как выполнена подчиняющая. Например, державка резца – *удерживать детали и сборочные единицы в заданном взаимном положении ( $\Phi_1$ ) и сохранять это положение при воздействии на него нагрузок, т. е. обеспечивать жесткость конструкции ( $\Phi_2$ )*. Функция  $\Phi_2$  является подчиненной по отношению к функции  $\Phi_1$ .  $\Phi_2$  – это дополнительное требование.

Например, станочное приспособление: *определяет положение заготовки на станке ( $\Phi_1$ ), удерживает заготовку в заданном положении ( $\Phi_2$ ) и воспринимает силы резания ( $\Phi_3$ )*. Функции  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  являются подчиненными по отношению к  $\Phi_1$ . А требование иметь высокую жесткость, т. е. не деформироваться в процессе обработки (иначе появится дополнительная погрешность) – это подчиненная функция. Ее можно выполнить, если выполняются первые три функции.

Сначала рекомендуется сформулировать функцию в том виде, как она естественно следует из условий решаемой задачи. Затем подобрать синонимы и выбрать наиболее емкий термин, т. е. обобщить понятия, которые участвуют в формулировке, как в отношении действия, так и в отношении объекта функции. Например, фреза – *резать металл*. Такая конкретная формулировка ориентирует на использование именно этого принципа действия – резать. Более общая формулировка – *удалять слой металла* – способствует поиску и других принципов действия. А формулировка – *обрабатывать заготовку* – настолько общая, что уже непонятно, о каком действии идет речь. Это может быть: *очищать, удалять* и т. д.

Объектом функции всегда является некоторый компонент ближайшей НС или свойство, характеризующее надсистему. Например, электрическая лампа: *излучать свет*, РО – нить накаливания; светильник: *освещать предметы*, ТО – светильник, ПЭ – нить накаливания, РО – отражатель, рассеиватель.

Функция лампы *излучать свет*. Можно сказать: *преобразовывать электрическую энергию в световую*. Но это вторая формулировка уже

ориентирует на использование электрической энергии, т. е. эта формулировка исключает из рассмотрения другие ФПД получения света. Например, в формулировке функции кондукторной втулки: *определять положение инструмента относительно заготовки*, произошло расширение функции. Эту функцию выполняет приспособление в целом.

**Функционально-структурный анализ.** Функциональный анализ нужно начинать с построения иерархической модели связи функций. Затем в ТС выделить функциональные компоненты и провести анализ выполняемых ими функций. Поскольку целью создания ТО является выполнение ГПФ, то функциональные компоненты нужно выделять по отношению их к ГПФ.

*Адекватный* – если изменение (увеличение или уменьшение) параметра, характеризующего эту функцию, приводит только к ухудшению выполняемой функции.

*Недостаточный* – если увеличение существенного свойства, характеризующего эту функцию, приводит к улучшению выполняемой функции.

*Избыточный* – если уменьшение параметра, характеризующего эту функцию, приводит к улучшению выполняемой функции.

Рассмотреть возможность полезного использования НЭ (прием – *обратить вред в пользу*).

**Пример 9.** Построение функциональной структуры втулки. Рассмотрим втулку, в которую устанавливается ведомая шестерня (рис. 5.4).

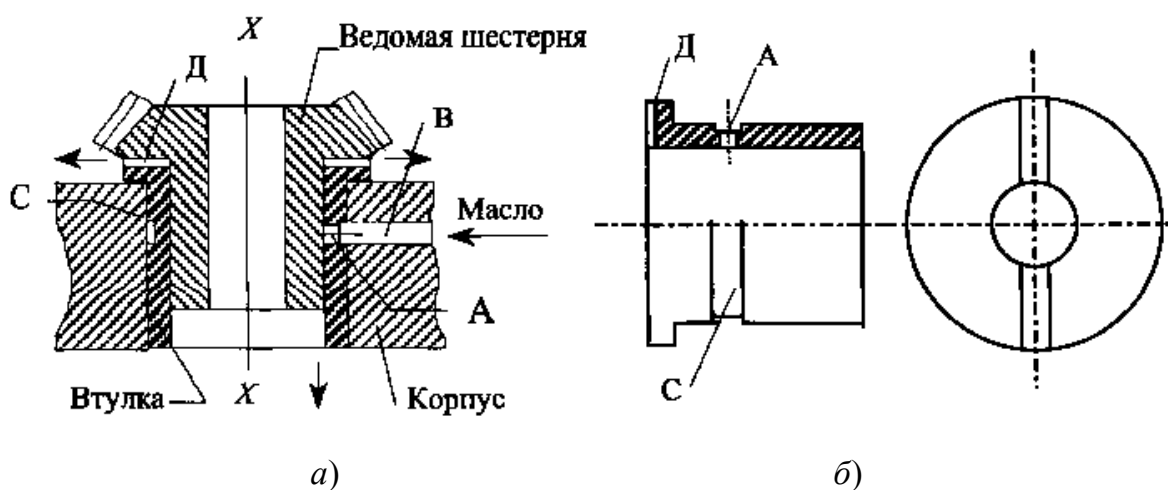


Рис. 5.4. Конструктивная схема работы втулки для ведомой шестерни:  
*а* – сборка; *б* – эскиз втулки: А, В – отверстия;  
 С, Д – канавки для прохода масла

Чтобы понять функции втулки, нужно рассмотреть не только ее функциональные компоненты, но и ее связи с НС, т. е. с корпусом, в который она установлена, и шестерней, которую она удерживает.

Для лучшего понимания схемы взаимосвязи функций, выполняемых компонентами рассматриваемой ТС, в модели связи функций (рис. 5.5) отражены функциональные компоненты.

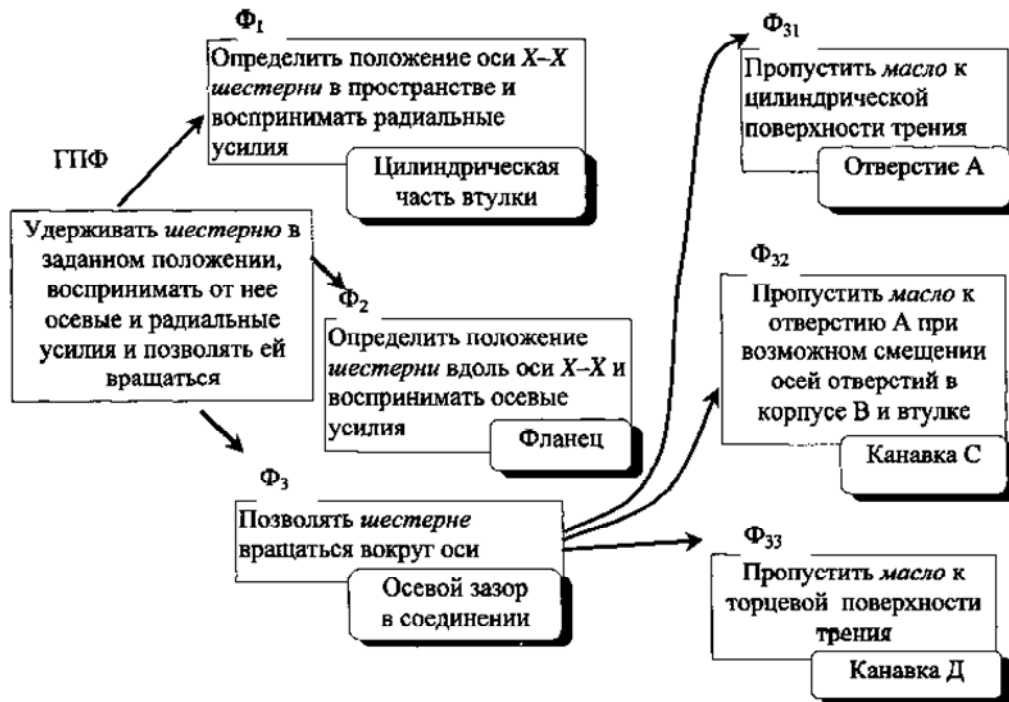


Рис. 5.5. Схема взаимосвязи функций втулки ведомой шестерни

Следует отметить, что в качестве функциональных компонентов могут быть не только детали, но и узлы, а также отдельные конструктивные элементы деталей.

Для упрощения модели, представленной на рис. 5.5, НЭ сведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Табличная модель

Компонент	Функция	Ранг функции	Уровень выполнения	Нежелательный эффект
Цилиндрическая часть внутренней	$\Phi_{11}$ – определяет положение оси $X-X$ шестерни в пространстве и воспринимает радиальные усилия	Основная	Избыточный*	Трение, неравномерный износ приводит к увеличению зазора в зубчатом соединении



Компонент	Функция	Ранг функции	Уровень выполнения	Нежелательный эффект
Цилиндрическая часть наружная	$\Phi_{12}$ – определяет положение оси $X-X$ втулки в пространстве относительно корпуса	Вспомогательная	Адекватный	Высокая точность диаметра. Высокие требования по соосности с внутренней цилиндрической поверхностью
Фланец	$\Phi_2$ – определяет положение <i>шестерни</i> вдоль оси $X-X$ . Воспринимает осевые усилия	Основная	Избыточный** Адекватный	Трение; износ приводит к увеличению зазора в зубчатом соединении
Цилиндрическая часть внутренняя	$\Phi_3$ – позволяет <i>шестерне</i> вращаться вокруг оси	Основная	Адекватный	Зазор в соединении приводит к дополнительному зазору в соединении шестерен
Отверстие А	$\Phi_{31}$ – пропускает <i>масло</i> к поверхности трения	Основная (Тр)	Недостаточный***	Действие локально, а нужно по всей поверхности трения
Канавка С	$\Phi_{32}$ – пропускает <i>масло</i> к отверстию «А» при возможном смещении осей отверстий в корпусе (В) и втулке (А)	Вспомогательная	Адекватный	Снижается прочность втулки, увеличивается гидравлическое сопротивление
Канавка Д	$\Phi_{33}$ – пропускает <i>масло</i> к поверхности трения: фланец втулки – фланец шестерни	Вспомогательная	Адекватный****	Увеличивает толщину фланца

\* Для ориентации шестерни достаточно двух поясков.

\*\* Базирование по плоскости определяет три координаты, а нужна только одна – положение вдоль оси  $X-X$ .

\*\*\* Можно усилить подачу масла в верхнюю часть, выполнив спиральные канавки на цилиндрической части шестерни.

\*\*\*\* Можно усилить функцию, используя центробежные силы, например, выполнить спиральную канавку на торцевой части шестерни, прилегающей к втулке. Можно усилить функцию, выполнив спиральную канавку на цилиндрической части шестерни.

В табличную модель можно ввести еще один раздел – мероприятия по устранению НЭ.

Иерархическая модель связи функций удобна тем, что позволяет более четко видеть взаимосвязь функций и, тем самым, хорошо представлять себе последствия возможных направлений изменения ТО с целью его совершенствования. Из этой схемы следует, что если найдется способ избавиться от одной из основных или вспомогательных функций высокого ранга, то тем самым пропадет вся цепочка функций справа от упраздненной функции. Например, втулка, выполненная из пористого материала, позволит не выполнять часть конструктивных элементов втулки, саму втулку установить в корпус на резьбе, тогда появится возможность регулировки зазора в соединении с шестерней, как при начальной сборке, так и по мере износа торцевой части шестерни или самой втулки. Можно снизить износ за счет локального упрочнения сопрягаемых поверхностей.

**Предметный подход.** При создании ТО, функционирование которых основано на преобразовании потоков веществ, информации и энергии (относящихся ко второй группе), важной задачей является формирование ФДП каждого преобразователя. Поэтому для таких ТО весьма полезной будет модель, предложенная А. И. Половинкиным [10], которую он назвал *потоковой функциональной системой* (ПФС). В этой модели отражается последовательность выполняемых физических операций по преобразованию потоков веществ, сигналов и полей, временная подчиненность выполняемых функций (действий).

**Пример 10.** Процесс образования отверстия с помощью пневмодрели. Рассмотрим ПФС процесса образования отверстия с помощью пневмодрели (рис. 5.6).

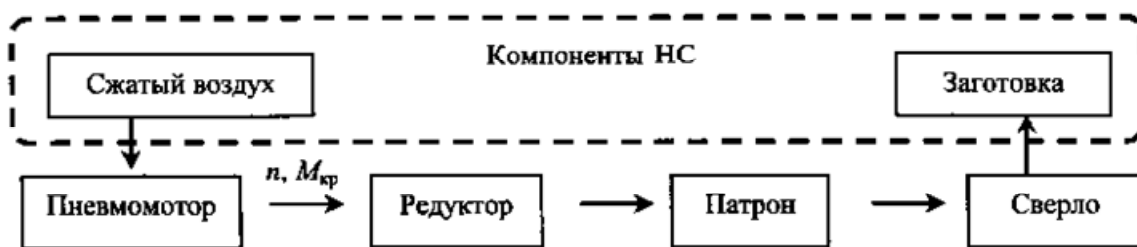


Рис. 5.6. Поточная функциональная схема процесса сверления отверстия пневмодрелью

Эвристическая полезность этой модели связана с использованием операции обобщающей абстракции (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Обобщенная потоковая функциональная схема образования отверстия

Применение обобщающего наименования способствует вовлечению в рассмотрение других ФПД для выполняемой операции, активизации мышления по привлечению аналогий для поиска возможных технических решений (табл. 5.5).

Таблица 5.5

**Примеры применения обобщающего наименования**

Компонент	Обобщающее наименование
Пружина, конденсатор, сжатый воздух	Накопитель потенциальной энергии
Напряжение электрического тока	Вид энергии, управляющего сигнала
Термометр, амперметр, ...	Измеритель параметра состояния
Фреза	Инструмент, РО
Трансформатор, редуктор	Преобразователь
Упор, предохранительный клапан	Ограничитель выполняемой функции
C-L-контур	Фильтр сигнала
Электродвигатель, генератор	Преобразователь одного вида энергии в другой

Для анализа функций компонентов, обеспечивающих конструктивную целостность технического устройства, А. И. Половинкиным была предложена модель, которую он назвал *конструктивная функциональная схема* (КФС). В этой модели в вершинах графа располагаются функциональные компоненты технического устройства, а ребра отражают конструктивные связи между ними. Конструктивные связи в КФС двухсторонние, поэтому граф КФС неориентированный (в отличие от иерархической модели и ПФС).

**Пример 11. Обратный клапан.** Обратные клапаны широко применяются в пневмо- и гидросистемах. Главная полезная функция обратного клапана – пропускать рабочую среду из полости *A* в полость *B* при повышенном давлении в полости *A* и не пропускать в обратном направлении при повышенном давлении в полости *B* (рис. 5.8).

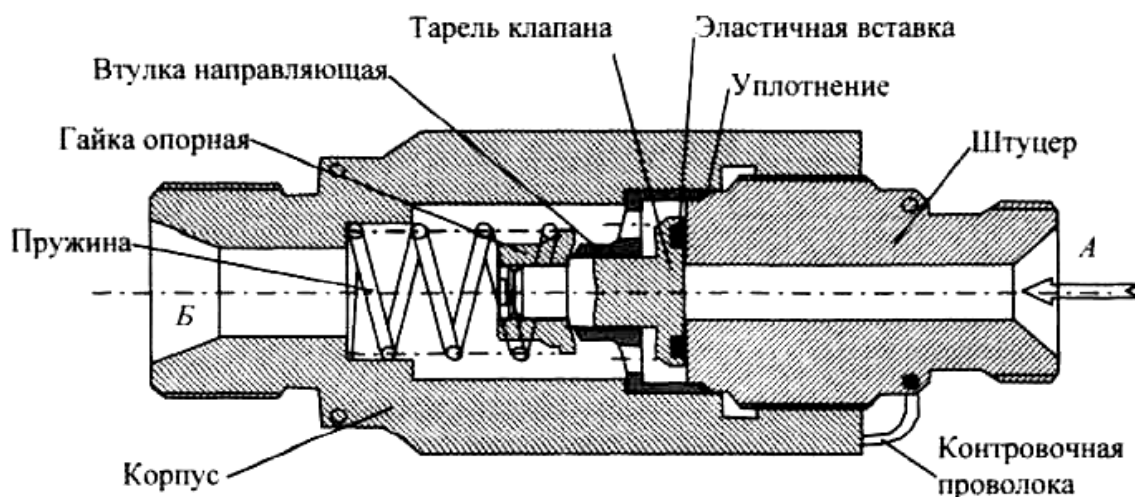


Рис. 5.8. Эскиз обратного клапана

Для проведения функционального анализа составляется табл. 5.6.

Следует отметить, что некоторые из перечисленных функциональных компонентов обеспечивают конструктивную целостность клапана, а некоторые – выполнение ГПФ. Но эти функциональные компоненты конструктивно связаны с теми, которые обеспечивают целостность системы.

Таблица 5.6

Табличная модель обратного клапана

Наименование компонента	Функция	НЭ
Корпус	Определяет положение штуцера и пружины. Соединяет клапан с трубопроводом	Уменьшает рабочее пространство
Пружина	Перемещает клапан и прижимает его к седлу	В положении «открыто» создает гидравлическое сопротивление
Гайка опорная	Передаёт усилие от пружины на клапан. Направляет пружину	Увеличивает габарит клапана
Втулка направляющая	Направляет движение клапана в корпусе	Подвижное соединение работает в рабочей среде, требуется высокая точность сопряжения, продукты износа засоряют трубопровод

Наименование компонента	Функция	НЭ
Тарель клапана	Открывает магистраль при повышении давления во входной полости и закрывает во всех остальных случаях	Создает инерционную нагрузку
Эластичная вставка	Герметизирует соединение тарель-штуцер	Увеличивает габарит клапана
Уплотнение	Герметизирует резьбовое соединение	Увеличивает радиальный габарит
Штуцер	Соединяет клапан с входным трубопроводом	Увеличивает габариты клапана
Контрольная проволока	Предотвращает самопроизвольное отвинчивание штуцера от корпуса	Усложняет конструкцию

Конструктивная функциональная схема в виде графа, представленного на рис. 5.9, отражает только конструктивные связи.



Рис. 5.9. Конструктивная функциональная схема обратного клапана

Конструктивная функциональная схема в большинстве случаев имеет сетевую структуру. На схеме, изображенной на рис. 5.9, видно, что число связей в КФС значительно больше, чем компонентов. И если для простых объектов это может быть не столь важно, то при ана-

лизе ТС, которые имеют большое число компонентов, получается громоздкая, плохо обозримая модель, которую сложно анализировать. В этом случае можно объединить несколько компонентов в одну фиксированную группу, т. е. применить иерархический подход к моделированию конструктивных связей.

Конструктивная функциональная схема направляет внимание на выбор КТР деталей и узлов: материалов, формы, взаимного расположения конструктивных элементов и видов соединений.

Виды и количество соединений существенно влияют на трудоемкость процессов сборки и производственные затраты. К посадочным поверхностям, как правило, предъявляются более высокие требования по точности изготовления, чем к другим поверхностям.

В рассмотренном примере для совершенствования конструкции можно применить следующие приемы: удаление, объединение и разъединение конструктивных элементов.

Например, в клапане, приведенном на рис. 5.8, можно рассмотреть следующие изменения:

- 1) упразднить управляющую втулку, передав ее функции корпусу;
- 2) эластичную вставку перенести со штуцера на тарель клапана;
- 3) упразднить гайку опорную, передав ее функции тарели и т. д.

Вычленение функций позволяет привлечь операцию изолирующей абстракции для поиска НЭ. Например, можно отметить следующие НЭ от усилия закрепления:

- 1) деформация заготовки от усилия закрепления и усилий резания;
- 2) образование вмятин на заготовке от контактирующих деталей: опорных и зажимных элементов.

В заключение необходимо отметить, что функциональный анализ и применяемые в нем модели – это один из начальных этапов решения технической задачи. Он предназначен, в первую очередь, для того, чтобы четко сформулировать задачи, которые нужно решать и позволяют концептуально определиться в выборе направлений поиска решений.

При решении задачи необходимо стремиться найти такие модели, которые позволяют глубже понять проблему и помогают в поиске решения. При выборе модели нужно четко осознавать, что модель должна быть обозрима, инструментальна и активизировать мышление. Поэтому выбор модели связан как с особенностями исследуемого ТО, видом его функционирования, так и с приоритетным типом мышления человека, решающего задачу.

## 5.5. Коллективные методы поиска новых решений

*Методы мозгового штурма*, или мозговой атаки (МА), основываются на следующем психологическом эффекте [10]. Если взять группу в 5–8 человек и каждому предложить независимо и индивидуально высказывать идеи и предложения по решению поставленной изобретательской или рационализаторской задачи, то в сумме можно получить  $N$  идей. Если предложить этой группе коллективно высказывать идеи по этой же задаче, то получится  $N_k$  идей. При этом оказывается, что  $N_k$  намного больше  $N$ .

Обычно за 15–30 мин коллективно высказывается (при соблюдении правил МА) от 50 до 150 разных идей, а при индивидуальной работе – только 10–20 идей.

Мозговую атаку целесообразно использовать:

- при решении изобретательских и рационализаторских задач в самых различных областях техники;
- на различных этапах решения творческой научной задачи и на различных стадиях разработки, проектирования и модернизации изделий;
- в сочетании с другими эвристическими методами.

### 5.5.1. Метод прямой мозговой атаки

*Формулировка задачи.* Постановка задачи перед творческой группой – участниками МА – может иметь самую различную форму и содержание. Однако в ней должны быть четко сформулированы два момента:

- что в итоге желательно получить или иметь;
- что мешает получению желаемого.

Задачу может сформулировать внешний заказчик, руководитель творческой группы или ее член. Важно одно – чтобы перед сеансом МА имелась достаточно исчерпывающая, четкая постановка задачи, желательно в документальном виде. Постановка задачи для МА должна также отличаться краткостью изложения.

*Формирование творческой группы.* Наиболее эффективное число участников в творческой группе для проведения сеанса МА составляет 5–12 человек, хотя допустимо и меньшее (до трех) и большее число участников.

Как правило, творческие группы состоят из двух подгрупп: постоянное ядро группы и временные члены. Ядро группы постепенно отбирается при решении различных задач методом МА. В ядро группы входят ее руководитель и сотрудники, легко и плодотворно генерирующие идеи, а также хорошо знающие и соблюдающие правила игры (правила для участников сеанса МА).

Временные члены приглашаются в зависимости от характера и содержания предстоящей задачи. В творческую группу никогда не включаются прирожденные скептики и критиканы. Временные члены служат необходимым и гармоничным дополнением к ядру группы, обеспечивающим выполнение следующих рекомендаций: число специалистов по решаемой задаче должно быть не более половины состава группы; в состав группы целесообразно включать специалистов-смежников (конструкторы, технологи, экономисты, снабженцы и т. д.), которые обеспечат комплексное и всестороннее рассмотрение задачи; в состав группы желательно включать женщин, которые весьма практично и оригинально мыслят, стимулируют и повышают дух соревнования среди мужчин; рекомендуется включать «людей со стороны», не имеющих никакого отношения к задаче (повар, врач, парикмахер, проводник поезда и т. д.), но способных творчески решать различные практические задачи.

*Правила для участников сеанса МА.* Их можно сформулировать следующим образом:

1. Стремитесь высказывать максимальное число идей. Отдавайте предпочтение количеству, а не качеству идей. Свои идеи высказывайте короткими предложениями.

2. Во время сеанса МА абсолютно запрещена критика предложенных идей. Запрещаются также неодобрительные замечания, иронические реплики, консервативные мысли, ядовитые шутки, например: «Так еще никогда не делали!»; «А что скажет директор?»; «Для практики это не годится!» и т. п. Запрет критики создает благоприятный творческий микроклимат.

3. Внешне и внутренне одобряйте и принимайте все идеи, даже заведомо непрактичные и, казалось бы, глупые. Оказывайте предпочтение не систематическому логическому мышлению, а озарениям, необузданной и безграничной фантазии в самых разных направлениях.

4. Весьма способствуют продуктивному мышлению шутки, каламбуры, юмор и смех. Поддерживайте и создавайте такую обстановку.



5. Стремитесь развивать, комбинировать и улучшать высказанные ранее идеи, получать от них новые ассоциативные идеи. Обеспечивайте между участниками МА свободные, демократические, дружелюбные и доверительные отношения. Никто после сеанса не будет зло шутить над неудачными идеями других.

*Обязанности ведущего (руководителя) в сеансе МА.* Успех и результативность МА в очень большой мере зависит от председателя совещания (ведущего), который осуществляет оперативное управление МА. Ведущий должен руководствоваться правилами для участников МА и поддерживать непринужденную обстановку и чувство юмора. Кроме того, на ведущего возлагаются следующие обязанности:

1. Ведущий четко и эмоционально излагает формулировку задачи как в специальном, так и в общедоступном изложении. При этом заставляет участников воспринимать задачу как свою главную проблему, усиливая постановку, например, такими замечаниями: «Представьте себя на месте того-то...»; «Что бы вы сделали, если бы сами отвечали за это дело?»

2. Ведущий должен уметь обеспечить соблюдение участниками всех правил проведения МА, не пользуясь при этом приказами и критическими замечаниями.

3. Ведущий должен обеспечивать непрерывность высказывания идей, заполнять паузу поощрительными репликами, например: «В свое время предлагалось то-то...»; «Давайте три минуты будем высказывать только непрактические и фантастические идеи»; «А что думаете по этому поводу Вы, Николай Петрович?»; «А какое будет решение задачи, если убрать такое-то ограничение?»; «У нас уже 35 идей, давайте дотянем до 40».

4. Ведущий должен следить, чтобы обсуждение не шло в слишком узком и практическом направлении, своими идеями или репликами расширять сферу поиска.

Ведущий должен следить за регламентом работы. Говорить, сколько времени осталось до конца сеанса. Тактично останавливать участника, который высказывает свою идею более полминуты, интенсифицировать работу последних минут, например, такими восклицаниями: «Неужели ничего не найдем в последние три минуты?!»; «Неужели мы не забьем гол в последнюю минуту?!».

*Организация проведения МА.* Приглашать на совещание (сеанс МА) желательно за 2–3 дня с изложением сути задачи, чтобы участники могли подумать и настроиться. Иногда бывает целесообразно заранее сообщить постановку задачи только части участников.

Полная продолжительность совещания (сеанса МА) составляет 1,5–2 ч. Совещание имеет следующий порядок проведения и соответствующие затраты времени на отдельные мероприятия:

- представление участников совещания друг другу и ознакомление их с правилами проведения сеанса МА (5–10 мин);
- постановка задачи ведущим с ответами на вопросы (10–15 мин);
- проведение МА (20–30 мин);
- перерыв (10 мин);
- составление отредактированного списка идей (30–45 мин).

Запись и оформление результатов МА. Фиксирование идей, высказываемых во время сеанса МА, производится одним из трех способов:

- среди участников имеется стенографист (можно записывать и не стенографическим текстом);
- с помощью магнитофона;
- каждый участник после высказывания записывает свою идею.

После сеанса проводится быстрое коллективное редактирование полученного списка идей с полукритическим отношением. При этом участники МА быстро отбрасывают наименее приемлемые и абсурдные идеи. Они могут также усилить и конкретизировать высказанные идеи и дополнить список новыми, возникшими во время редактирования. Все полученные идеи желательно разделить на три группы: наиболее приемлемые и легко реализуемые для решаемой задачи, наиболее эффективные и перспективные, прочие.

Отредактированный и оформленный список передается ведущему конструктору для дальнейшей более детальной оценки и проработки с точки зрения патентоведения и использования в проектно-конструкторских разработках.

### ***5.5.2. Метод обратной мозговой атаки***

*Теоретические предпосылки.* В основе обратной мозговой атаки лежит закон прогрессивной конструктивной эволюции ТО. По этому закону переход к новым образцам техники происходит через выявление и устранение дефектов (недостатков) в существующем поколении ТО при наличии необходимого научно-технического потенциала.

Поэтому при создании любого нового, значительно улучшенного изделия решаются две задачи:

1. Выявление в существующих изделиях максимального числа недостатков.

2. Максимальное устранение этих недостатков в разрабатываемом новом изделии.

Первая задача относится к постановке изобретательских и проектно-конструкторских задач, вторая – к синтезу нового технического решения. Первая задача оказывается сложной, поскольку необходимо выявить полный список недостатков, который состоит из двух частей:

– недостатки, обнаруженные при изготовлении, эксплуатации, ремонте и утилизации выпускаемых изделий;

– недостатки, которые возникнут в обозримом будущем у разрабатываемого изделия. Таким образом, методы решения первой задачи должны не только обеспечивать выявление всех известных недостатков, но и прогнозировать все будущие недостатки.

Гипотетически существует некоторый идеальный полный список недостатков, каждый из которых может быть устранен или учтен в новом изделии, в результате чего новое изделие будет реализовывать максимально возможный скачок для существующего научно-технического уровня.

*Область применения метода.* Метод обратной МА ориентирован на решение первой творческой задачи, т. е. цель обратной МА заключается в составлении наиболее полного списка недостатков рассматриваемого объекта, на который обрушивается ничем не ограниченная критика. Объектом обратной МА может быть конкретное изделие или его узел, технологический процесс или его операция, сфера управления производством и т. д.

Обратная МА может быть использована при решении, например, следующих вопросов и задач:

– уточнение постановки изобретательских и рационализаторских задач;

– разработка технического задания или технического предложения;

– экспертиза проектно-конструкторской документации на любой стадии разработки (техническое задание, техническое предложение, эскизный, технический или рабочий проект, экспериментальный или опытный образец);

– оценка эффективности закупаемых изделий.

*Формулировка задачи.* Формулировка задачи для обратной МА должна содержать краткие и достаточно исчерпывающие ответы на следующие вопросы:

1. Что представляет собой объект, который требуется улучшить?

2. Какие известны недостатки объекта, связанные с его изготовлением, эксплуатацией, ремонтом и т. д.?

3. Что требуется получить в результате МА? (МА должна дать максимально полный список недостатков и дефектов у рассматриваемого объекта: «Во время сеанса МА мы должны прозорливо угадать все будущие недостатки на 10–20 лет вперед, чтобы полученный полный их список обеспечивал наиболее длительную конкурентоспособность созданного объекта».)

4. На что нужно обратить особое внимание? (Нужно указать, в каком направлении особенно нетерпимы недостатки и дефекты, например: прочность определенных деталей, надежность работы системы, экономия топлива, охрана окружающей среды, удобства эксплуатации, ремонта и т. п.)

*Формирование творческой группы.* Здесь остаются в силе рекомендации, изложенные выше. Кроме того, в творческую группу необходимо включить технологов, наладчиков, ремонтников, эксплуатационников, работников по сбыту и продаже.

*Правила для участников сеанса обратной МА* совпадают с правилами проведения прямой МА.

*Обязанности ведущего (руководителя) в сеансе МА* совпадают с обязанностями, изложенными выше. Для обеспечения непрерывности высказывания идей и полноты формируемого списка недостатков ведущему рекомендуется использовать следующий список вопросов:

У каких параметров объекта или его элемента ожидаются отклонения от нормы? Какие ожидаются трудности изготовления, сборки, контроля изделия или его отдельных узлов? Какие могут возникнуть затруднения с материалами и комплектующими деталями и узлами в настоящее время и через 10–20 лет? Какие ожидаются трудности энергоснабжения в данное время и через 10–20 лет? Какие неудобства в обслуживании, или какие могут возникнуть ошибки оператора? Могут ли возникнуть опасные моменты для пользователей и обслуживающего персонала? Какие возможны трудности доставки и транспортирования в настоящее время и через 10–20 лет?

*Организация проведения МА* совпадает с описанной выше.

*Запись и оформление результатов МА.* В дополнение к рекомендациям, изложенным выше, выполняется классификация недостатков по родственным группам. Могут быть выделены, например, следующие группы: основные функциональные требования, производство, сбыт, эксплуатация, защита окружающей среды. Проводится ранжирование недостатков от самых больших (главных) до малых (второстепенных). Ранжирование можно выполнить также путем отнесения каждого недостатка к главным, средним или второстепенным недостаткам.

Если список недостатков составляется с целью последующего его использования в постановке и решении изобретательских или рационализаторских задач, то желательно еще составить таблицу анализа недостатков (пример анализа недостатков приведен в табл. 5.7).

### 5.5.3. Комбинированные методы мозговой атаки

Изложенные методы прямой и обратной МА могут быть совместно использованы в различных комбинациях.

**Двойная прямая мозговая атака.** Суть ее заключается в том, что после проведения прямой МА делается перерыв от двух часов до двух-трех дней и еще раз повторяется прямая МА. Практика показала, что при проведении второй МА по одной и той же задаче часто выявляются наиболее ценные практически полезные идеи или удачное развитие идей первого совещания, т. е. во время перерыва включается в работу мощный аппарат решения творческих задач – подсознание человека, синтезирующее неожиданные фундаментальные идеи.

Таблица 5.7

Пример анализа недостатков

Наименование недостатка	Фактические или возможные следствия проявления недостатка	Фактические или возможные причины возникновения недостатка
1. Плохая подвижность шарнирной передачи	1.1. Потеря мощности	1.1. Некачественная обработка
	1.2. Ускоренное изнашивание шарнира	1.2. Малый зазор поверхностей трущейся пары
	1.3. Разрушение шарнира	1.3. Непредусмотренные температурные перепады
2. Неучет гололеда на автодороге	Скольжение транспорта с потерей управления	Повышенная влажность и низкая температура воздуха
3. Отказ шариковой авторучки	Шариковая авторучка перестает оставлять след на бумаге в виде слоя пасты	3.1. Понижение давления в баллоне с пастой
		3.2. Заклинивание шарика
		3.3. Увеличение вязкости пасты в связи с понижением температуры

**Обратная и прямая мозговые атаки** (прогнозирование развития техники). Как уже отмечалось, развитие ТО представляет собой повторяющийся цикл: существующее изделие – выявление недостатков –

устранение недостатков в новой серии изделий. Эту закономерность можно использовать для мысленного моделирования и прогнозирования развития интересующего класса изделий. Для этого сначала с помощью обратной МА выявляют все недостатки существующего изделия и выделяют среди них главные. Затем проводят прямую МА для устранения выявленных главных недостатков и разрабатывают эскиз нового технического решения, в котором, по возможности, устранены или учтены эти недостатки.

**Прямая и обратная мозговые атаки** (прогнозирование недостатков технического объекта). Указанную выше закономерность развития техники можно также использовать для прогнозирования недостатков интересующего класса изделий. Для этого сначала проводят прямую МА и делают эскизы наиболее перспективных технических решений, затем обратную МА и выявляют возможные недостатки этих технических решений.

**Мозговая атака с оценкой идей.** Предназначена для решения сложных конструкторских задач и выполняется в три этапа.

**Первый этап** (первое совещание). Проводят прямую МА. Составленный общий список идей передается каждому участнику совещания. Каждый участник получает задание индивидуально (независимо от других) отобрать из общего списка от трех до пяти лучших идей с указанием их преимуществ. При этом разрешается добавлять свои новые идеи.

**Второй этап** (второе совещание). Каждый участник сообщает об отобранных им (или предложенных дополнительно) трех-пяти идеях с указанием их достоинств. По каждой идее проводится короткая (5–10 мин) МА в целях: выдвижения идей по улучшению предложенного варианта; выявления недостатков; выдвижения идей по устранению недостатков. При этом одинаковые идеи повторно не обсуждаются.

В результате обсуждения составляют таблицу положительно-отрицательной оценки идей. Каждому участнику дается задание выбрать из таблицы независимо от других один или два наилучших варианта и представить по ним эскизы технического решения.

**Третий этап** (третье совещание). Обсуждаются представленные эскизы в целях ранжирования их от лучших к худшим. Составляются предложения с описанием наилучших технических решений.

**Пример 12.** Внутри цеха имеется пневмотранспорт с диаметром трубы 300 мм, который доставляет на рабочие места порошок и мелкие пластмассовые заготовки. Цех перевели на изготовление новой про-

дукции, для производства которой на рабочие места требуется дополнительно подавать еще и крупные заготовки с габаритными размерами, значительно превышающими диаметр трубопровода. Необходимо обеспечить доставку крупных заготовок от склада до рабочих мест, причем внутри цеха отсутствуют транспортные проезды, а в верхней части цеха нет свободного пространства для установки и работы кранового оборудования.

Список недостатков прототипа и базового решения, их анализ (по результатам обратной МА) (табл. 5.8):

1. Если использовать пневмотранспорт, то возникают значительные дополнительные затраты, связанные с демонтажом трубопроводов и установкой новых трубопроводов с большим диаметром.

2. После установки трубопровода с большим диаметром могут появиться заготовки с габаритными размерами, превышающими этот диаметр, что потребует новой замены трубопровода.

3. Заготовки при движении в трубопроводе ударяются, трутся и в результате теряют товарный вид, что противоречит тенденции повышения качества изделий.

4. При транспортировке по трубам более крупных заготовок повышается шум в цехе.

Таблица 5.8

#### Пример анализа вариантов решений

Нереальные	Простые	Перспективные
1. Крупные заготовки сами собой передаются от склада к рабочим местам	1. Доставлять крупные заготовки на рабочие места вручную	1. Провести дополнительный трубопровод с большим диаметром (базовое решение)
	2. Расчистить пространство в верхней части цеха для установки кранового оборудования	
	3. Произвести перепланировку оборудования для возможности доставки крупных заготовок колесным транспортом	

Ранжирование недостатков:

- затраты по замене трубопровода;
- удары и трение деталей друг о друга и стенки трубы;
- шум от трубопровода;
- зависимость размеров трубопровода от габаритных размеров деталей.

Список идей по устранению недостатков прототипа и базового решения (*по результатам повторной прямой МА*):

1. Использовать пространство, занимаемое трубопроводом, для размещения приводного цепного конвейера.

2. Использовать пространство, занимаемое трубопроводом, для приводного рольганга.

3. Использовать имеющийся трубопровод как привод для перемещения тележек, движущихся по направляющим.

*Решение задачи*

Выбираем решение 3 из числа предложенных, так как оно лишено большинства выявленных недостатков. Оно может быть реализовано следующим образом.

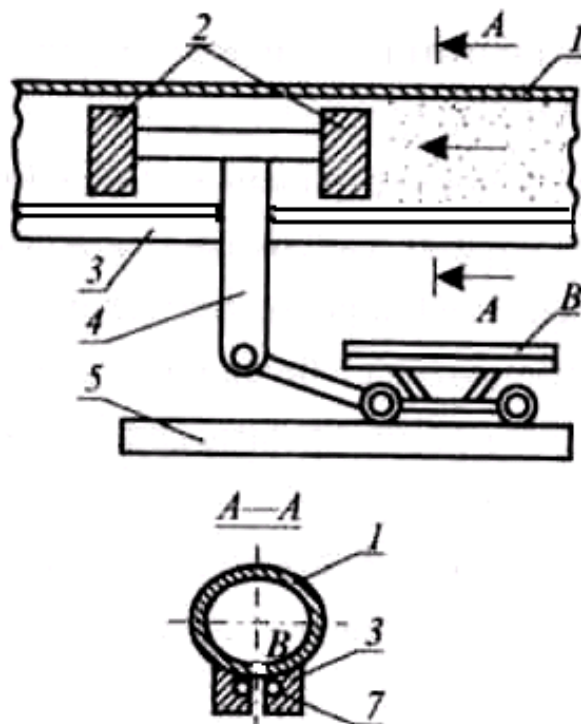


Рис. 5.10. Принципиальная схема устройства

Внутри трубопровода (рис. 5.10) перемещается поршень-каретка 2. По всей длине трубы сделана щель 3, через которую пропущен прикрепленный к каретке рычаг 4, соединенный с катящейся по направляющим 5 грузовой платформой 6, на которую укладывают крупногабаритные детали. Щель в трубе закрывают две эластичные трубки 7, заполненные воздухом под давлением и находящиеся в направляющих 3. Рычаг скользит между трубками, которые смыкаются за ним, закрывая щель.



## 5.6. Методы индивидуального поиска новых решений

### 5.6.1. Метод синектики

Слово «синектика» (*synectics*, иногда *synactic*) составлено из двух древнегреческих слов: *syn* – вместе и *actics* – действовать, совершать, поступать. Это словосочетание означает совместно действовать, а применительно к методу решения задач имеет смысл «совместно искать», «вместе находить», «сообща придумывать», «вместе изобретать». В некоторых источниках вторую часть слова *ectos* переводят как «снаружи», что соответствует возможностям синектики переводить подсознательные ощущения в ясные сознательные решения.

**Пример 13.** *Снижение шума системы вентиляции.* Представим себе, как будут решать задачу снижения акустического шума системы вентиляции в цехе специалисты разного профиля.

Специалист, окончивший вуз, кроме учебных дисциплин своей специальности изучал много смежных дисциплин. Поэтому он может предположить, как будут рассуждать те или иные специалисты о проблеме гашения шума.

*Материаловед:* поставить звукопоглощающий материал.

*Механик:* повесить жесткость коробов и их крепления, чтобы снизить вибрации.

*Акустик:* поставить звукоизолирующие экраны либо форму конструкции сделать такой, чтобы звуковые колебания поглощались за счет резонанса (резонатор Гельмгольца).

*Радист:* вибрация – это колебания, надо поставить активное шумогашение – источники шума того же спектра, но в противофазе.

*Аэродинамик:* источник акустических колебаний – турбулентность, ее надо устранить и принять меры для создания ламинарного потока.

Для решения указанной задачи можно использовать ряд аналогий – с радиоволнами, с волнами на поверхности водной глади. Заросли камыша гасят волны на воде, металлический экран не пропускает радиоволны, отраженный сигнал, складываясь с прямым, может формировать зоны замирания сигнала и другие аналогии. Такой разносторонний подход к проблеме позволяет найти продуктивное комплексное решение.

### 5.6.2. Методы аналогии

**Прямая аналогия.** Аналогия – слово греческого происхождения, которое имеет два значения: 1) сходство в каком-либо отношении между предметами или явлениями. Например, такое сходство можно наблюдать у звуковых и электромагнитных волн: интерференция, законы отражения и преломления; 2) умозаключение, в котором на основании сходства двух предметов или явлений в каком-либо отношении делается вывод об их сходстве в другом отношении.

При рассуждении по аналогии сопоставляются два объекта. На основании их сходства в некоторых признаках делается вывод об их сходстве в других признаках. При таком рассуждении знания, полученные при рассмотрении одного объекта, переносятся на другой менее изученный объект.

**Припоминание** – извлечение информации из долговременной памяти.

**Воспоминание** – то же, но локализуемое во времени и в пространстве.

**Воображение** – создание образов, соответствующих описанию объекта. Воображение позволяет представить результаты труда до его начала, тем самым, ориентируя человека в процессе деятельности. Оно создает некоторые модели конечного продукта труда – результата, что способствует его предметному воплощению.

При реализации этого метода необходимо выбрать базовое устройство, выделить необходимые действия при его работе; на каждое действие необходимо сформировать устройство.

Используя литературу и другие источники, находим аналогии предлагаемых устройств. Из найденных аналогов формируем окончательное решение.

**Пример 14.** Произвести автоматизацию токарной операции.

В качестве базового выбираем универсальный токарный станок, возле которого расположены накопители заготовок и инструментов, тара для готовых деталей.

Записываем необходимые действия рабочего:

- 1) установка инструмента в резцедержателе;
- 2) настройка инструмента на размер;
- 3) закрепление инструмента;
- 4) установка заготовки в патрон станка;
- 5) закрепление заготовки;
- 6) настройка станка на требуемые режимы резания (РР);
- 7) обработка поверхности заготовки;

- 8) проверка размеров обработанных поверхностей;
- 9) открепление детали;
- 10) перемещение детали в тару;
- 11) обеспечение безопасной работы на станке.

Формируем устройство для обеспечения каждого действия.

Производим поиск каждого устройства по всем источникам информации.

**Символическая аналогия.** Объективный исходный предмет сопоставляется с абстрактным предметом, символом, представляющим некоторый художественный образ, создающий определенный эмоциональный контекст. В широком смысле механизм символической аналогии – это представление объекта в виде символа, рисунка, образа, знака, пиктограммы.

**Аналогия операций.** Аналогия операций является одним из наиболее распространенных видов прямой аналогии. Она характеризует направленность мышления, связанную со свободным ассоциативным поиском в области материальных объектов выполняемых операций, принципов действия, функций, а также способов решения задач. Поиск осуществляется, прежде всего, в сторонних отраслях знаний, например, биологии, геологии, астрономии. Еще У. Гордон [27] подметил, что биология – самая продуктивная область для нахождения аналогий. Это подтвердилось фактом создания новой науки на стыке биологии и техники – бионики.

**Пример 15. Некоторые аналогии операций.** Детская игрушка волчок натолкнула изобретателя Э. Сперри на создание гироскопических приборов для автоматического управления самолетом.

В. Вестингауз долго бился над проблемой создания тормозов, которые бы одновременно действовали по всей длине железнодорожного состава (XIX в.). Случайно прочитав в журнале, что на строительстве тоннеля в Швейцарии буровая установка приводится в действие сжатым воздухом, передаваемым от компрессора с помощью длинного шланга, Вестингауз увидел ключ к решению своей проблемы.

Когда потребовалось создать прибор, обнаруживающий приближение шторма, то выяснилось, что в природе очень точно за 10...15 ч предугадывает шторм обыкновенная медуза. Исследования показали, что медуза очень чувствительна к инфразвуковым волнам частотой 8...13 Гц. Оказалось, что эти колебания являются предвестником надвигающегося шторма. Таким образом была поставлена задача разработки прибора с соответствующей чувствительностью, которая и была решена.

Устройство для движения в грунте было создано инженерами после тщательного изучения «принципа работы» корабельного червя тередо, прокладывающего себе тоннель в бревне. Первые машины для подземных работ отбрасывали грунт назад. Инженер А. Требелев поместил крота в ящик с утрамбованной землей и просвечивал ящик рентгеновскими лучами. Оказалось, что крот все время вертит головой, вдавливая грунт в стенки туннеля, что явилось удачным решением для создания искусственного крота.

**Аналогия строения.** Изобретатель А. М. Игнатъев, оцарапанный котенком, задумался: почему когти кошки, зубы белки и зайца, клюв дятла постоянно острые? Он пришел к выводу, что самозатачивание происходит благодаря многослойной конструкции зубов: более твердые слои окружены более мягкими. Этот принцип он воплотил в самозатачивающихся резцах.

Буровая коронка построена по образцу зубов вымерших ящеров, многоярусные башни В. Г. Шухова по строению подобны стеблю растений.

**Аналогия формы.** Этот вид аналогии заключается в том, что вновь создаваемый объект по внешнему виду выполняется подобным уже известному, свойства которого желательно получить. Например, трехслойные конструкции с сотовым наполнителем, радиаторы подобны пчелиным сотам. До создания теоретических основ гидродинамики строители лодок и кораблей для получения хороших ходовых качеств судов копировали форму тела рыб.

#### **Аналогия отношений**

**Пример 16.** Легкие электроны движутся по замкнутым траекториям вокруг атома подобно движению планет вокруг солнца. В этой аналогии устанавливается сходство не самих предметов, а отношений между ними. Отношение между ядром и электронами во многом подобно отношению между солнцем и планетами. На основании этого сходства можно высказать предположение, что электроны, как и планеты, движутся не по круговым, а по эллиптическим траекториям. Это умозаключение по аналогии опирается уже не на сходство предметов, а на сходство отношений между совершенно разными предметами.

**Фантастическая аналогия.** Фантастическая аналогия допускает возможность существования любых функций (летать, проходить сквозь стены, читать мысли и т. п.), которые связаны с решением задачи.

Одним из направлений фантастической аналогии является отрицание физических законов, мешающих подойти к решению задачи (нет силы тяжести, разноименные заряды не притягиваются, магнит-

ное поле не действует на сплавы железа, свет распространяется по кривой линии и т. п.). Можно вообразить нужный закон или явление, не существующее в природе (универсальный растворитель, сверхпроводимость, или сублимация металлов и сплавов при нормальных условиях, сверхтекучесть воды и т. п.). Фантастическая аналогия раскрепощает воображение, дает ощущение простоты и легкости при решении задачи.

Последовательность решения технических задач методом фантастической аналогии:

- 1) выбирается устройство, которое необходимо усовершенствовать;
- 2) определяется техническая задача;
- 3) формулируется техническое противоречие;
- 4) мысленно устройство перемещают в фантастический мир, где все противоречия и поставленная задача решены;
- 5) анализируют, почему техническое противоречие исчерпано;
- 6) анализируя причинно-следственные связи, находят новое техническое решение.

**Личностная аналогия.** Последовательность решения технических задач методом личностной аналогии:

- 1) выбирается объект (устройство);
- 2) формулируется техническая задача;
- 3) находят техническое противоречие;
- 4) мысленно помещают себя внутрь проблемы так, чтобы условия, которые создавало техническое противоречие, действовали непосредственно на вас;
- 5) обостряя собственные ощущения, находят техническое решение, которое бы облегчало ваше положение внутри механизма.

**Природная аналогия.** Последовательность решения технических задач методом природной аналогии:

- 1) выбирается объект (устройство);
- 2) формулируется техническая задача;
- 3) находят техническое противоречие;
- 4) находят природный аналог, в котором решена аналогичная задача;
- 5) анализируя природный аналог, создают новое техническое решение.

Рассмотрим применение природной аналогии на примерах.

**Пример 17.** В гидросистемах оборудования, особенно в скоростных золотниках, возникают потери из-за завихрения гидропотоков. Такое гидросопротивление пропорционально скорости потока и снижает их эффективность при использовании в гидроприводах оборудования. Необходимо найти форму элементов золотника, обеспечивающую работу со скоростными гидропотоками.

Как известно, в природе рыба-меч при движении в воде развивает скорость до 140 км/ч, дельфин для обеспечения скорости движения создает вибрацию своего верхнего слоя, за счет этого снижается коэффициент взаимодействия жидкости с поверхностью. Изучив форму рыбы-меч и частоту вибраций, были разработаны специальные гидродинамические золотники, форма верхней части которых была оптимизирована.

**Пример 18.** В передачах «винт–гайка» станка, а также в направляющих повышается трение и износ из-за попадания на них элементов абразивных частиц, находящихся в воздухе при абразивной обработке.

Необходимо разработать защитный кожух. Он должен обеспечивать достаточную герметичность, но в то же время должен быть подвижным и не быть подверженным воздействию раскаленной стружки.

В природе существуют аналогии: листья, цветы, которые к вечеру сворачиваются, а утром – разворачиваются, т. е. аналог трансформации.

По аналогии такие стальные кожухи могут быть выполнены в форме свернутого листа.

**Пример 19.** Необходимо подготовить поверхность листового материала под покрытие. Чтобы получилось качественное покрытие, требуется низкая шероховатость.

Для обеспечения производительности необходима одновременная обработка с двух сторон. В процессе обработки лист получает деформации, которые приводят к его поперечным колебаниям, а значит, снижается шероховатость и образуется волнистость.

В качестве природного аналога использовался лист травы. Он имеет форму желоба, что повышает его жесткость.

Используя этот аналог, предлагается изготавливать абразивные инструменты: один – выпуклый (бочкообразный), а второй – вогнутый (рис. 5.11).

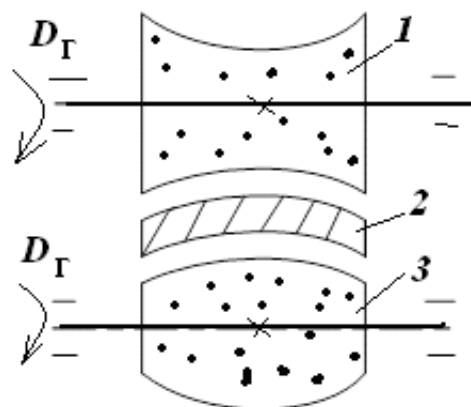


Рис. 5.11. Принципиальная схема устройства:  
1, 3 – абразивные инструменты; 2 – обрабатываемая деталь

**Пример 20.** В станках и роботах для уменьшения веса и сокращения кинематических цепей двигатель размещают ближе к передаточно-му механизму. При переносе двигателя на движущиеся узлы необходимо обеспечить подвод высоковольтного напряжения движущимся элементам.

Для обеспечения защиты проводов применяют многослойную изоляцию. Проблема: как удерживать провод в подвижном состоянии.

В качестве природного аналога можно использовать: вантовые конструкции на примере паутины.

Таким образом, электрический кабель подвешивают на дополнительный несущий провод.

**Пример 21.** При разработке конструкций станка необходимо конструктивными способами обеспечивать снижение уровня шума. Для этого используют защитные кожухи, которые, по замыслу конструкторов, должны иметь эстетический, легкий вид, что снижает их прочность и виброустойчивость. То есть требуется создать такую конструкцию, чтобы она обладала прочностью и легкостью.

Природный аналог – яйцо. Толщина оболочки составляет 0,3 мм, но обеспечивает хорошую прочность, так как состоит из семи слоев.

Используя композиционные материалы, изготавливают кожух многослойным в виде оболочки.

**Пример 22.** При проектировании базовых деталей станка, возникает проблема: с одной стороны, они должны обладать минимальной инерционностью, т. е. обеспечивать высокоскоростное перемещение, при котором в момент торможения возникают удары, с другой стороны, они должны обладать высокой прочностью и статической точностью.

Природный аналог – листья деревьев, которые за счет ребристой конструкции обеспечивают достаточную жесткость при относительной легкости.

По аналогии в конструкциях базовых деталей необходимо вводить ребра жесткости.

**Пример 23.** В конструкциях оборудования часто приходится использовать биметаллические конструкции либо применяют покрытия определенной толщины из композиционных материалов. Проблема: контроль качества биметаллического соединения или покрытия.

Природный аналог – живые радары (действия дятла, который стучит по дереву, создавая упругие волны, и улавливает их отражения. Если внутри дерева находится червь, то он искажает волну.)

Используя эту аналогию, разработали радарные приборы, которые создают упругую волну и улавливают отраженную, обеспечивая контроль качества покрытия.

**Пример 24.** Для получения игрушек из композиционных материалов необходимо добиться низкой шероховатости в литейной форме. Задача: как проконтролировать шероховатость в сложной литейной форме.

Природный аналог – природные эхолокаторы (летучая мышь). Летучая мышь улавливает отраженный сигнал в 2000 раз слабее, чем испускаемый.

Используя природную аналогию, разработали радарные установки с мощностью и длиной волны, соответствующей шероховатости измеряемой поверхности.

**Пример 25.** В конструкции современных роботов необходимо разработать приводы перемещения «пальцев» схвата. Во время работы пальцы должны иметь большие перемещения, а привод должен быть компактным. Кроме того, усилия захвата должны обеспечивать перемещение металлических изделий.

Природный аналог – движение паука по паутине за счет изменения внутреннего давления. Используя природную аналогию, разработаны конструкции искусственных мышц из упругих элементов.

**Пример 26.** Автоматизированное производство. В его условиях эксплуатируют различное оборудование (станки с высокоскоростной обработкой, высокоскоростные роботы). Возникает проблема влияния условий обработки на условия эксплуатации узлов (на температурные деформации). Необходимо обеспечить контроль этого явления и устройство, компенсирующее его. Кроме того, чем меньше датчики, тем компактнее устройство.



Природный аналог: хамелеон, который изменяет свой окрас при изменении  $t$  °С.

Техническое решение: разработка составов покрытий с изменяющимся цветом под действием температуры.

**Пример 27.** Необходимо разработать конструкцию захвата робота, транспортирующего длинные, легко повреждаемые изделия.

Природный аналог: огурец, виноград, который крепится за счет винтовых захватов.

Техническое решение: выполнение захвата в виде винтовой трубки, изготовленной из композиционного полимерного материала или резины. Подавая воздух или жидкость с высоким давлением внутрь трубки, происходит зажим изделия, а снижая давление – разжим.

**Пример 28.** Автоматическое производство. Для его обеспечения заготовки и детали располагают в многоярусных складах, которые обслуживаются манипуляторами-штабелерами. Техническая задача: при увеличении емкости склада увеличивается высота манипулятора-штабелера. Обостряется проблема устойчивости базовой детали этого манипулятора.

Природный аналог: стеблевая конструкция ржи. Отношение диаметра к длине 1 : 500. Устойчивость стеблю придают демпфирующие узлы.

Техническое решение: в конструкции манипулятора-штабелера используют демпфирующие элементы.

**Пример 29.** В автоматизированном производстве могут в процессе обработки происходить возгорания легких материалов (масло, химические добавки и др.). Необходимо обеспечить санитарные нормы эксплуатации оборудования. Требуется контроль состояния зоны обработки.

Природный аналог: обоняние акулы, собаки, которая различает приблизительно 500 тыс. запахов.

Изучая биологическую систему рецепторов, были разработаны тактильные датчики, которые установлены на роботы или станки.

**Пример 30.** В процессе ремонта узлов необходимо определить, без разборки самих узлов, имеются ли микротрещины либо инородные загрязнения элементов, т. е. необходимо обследование закрытых поверхностей в условиях плохой освещенности.

Природная аналогия: камерный глаз кота, крокодила, который может различать предметы при интенсивности света в шесть раз меньшей, чем человек, за счет внутреннего отражения светового потока в глазном яблоке.

Технически были созданы оптические датчики с внутренними отражателями на основе оптических волокон.

**Пример 31.** При исследовании влияния теплоты на отдельные узлы оборудования используются датчики, аналогом которых являются термодатчики. Курица клювом ощущает изменение температуры в  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , гремучая змея – ощущает изменения в  $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Пример 32.** В автоматизированном производстве требуются конструкции датчиков, имеющие минимальные габариты и позволяющие определить не только перемещение, но и скорость.

Природный аналог: мозаичное зрение – речной рак имеет 3000 рецепторов в глазу, стрекоза – 28000, каждый из которых формирует часть объекта, что позволяет определять направление и скорость его перемещения.

**Пример 33.** При эксплуатации различных автоматизированных устройств в помещении, имеющем повышенную пожарную опасность, возрастают требования к системе освещения. В лампочке накаливания 30 % энергии идет на освещение, а 70 % на обогрев, что недопустимо для таких условий.

Природный аналог – светлячок. За счет преобразования химических реакций биологические клетки начинают светиться.

На основе этого природного эффекта разработаны элементы, которые используют электрохимические реакции, обеспечивающие освещенность без нагрева.

**Пример 34.** В автоматизированном производстве при обработке листового материала требуются конструкции захватов, обеспечивающих высокую жесткость, точность при минимальных габаритах.

Природный аналог: муха – перемещается за счет создания вакуума в лапках (в виде присосок).

Технически используются захваты в виде присосок из прорезиненных (конструкционных) материалов, внутрь которых для разжима листового материала подается воздух.

**Пример 35.** При получении корпусных деталей из полимербетона требуется обеспечение однородности материала, т. е. необходимо внутреннее перемешивание слоев.

Природный аналог: процесс погружения ящерицы в песок за счет вибраций.

В технике – это использование вибраторов при формировании материалов.

**Пример 36.** В конструкциях станка используют корпусные детали, которые необходимо изготовить по специальным формам, что

снижает серийность, повышает себестоимость. Проблема – повышение серийности.

Природный аналог: пчелиные соты – состоят из отдельных унифицированных ячеек.

В технике сложные корпусные детали разделили на отдельные блоки. Из таких блоков производят конструирование узлов станка, что повысило серийность изготовления отдельных блоков и снизило их стоимость.

### 5.6.3. Символьный метод

Алгоритм метода:

- выбирается объект;
- определяются основные признаки объекта (движения или составные части);
- принимаются условные символьные обозначения основных признаков;
- записывается код выбранного объекта с использованием принятых символов;
- меняют местами символы кода;
- изображают новый объект, соответствующий новому коду;
- анализируют полученный объект.

**Пример 37.** Создать новую компоновку вертикально-фрезерного станка.

Выбираем компоновку базового станка и указываем основные и вспомогательные движения узлов (рис. 5.12).

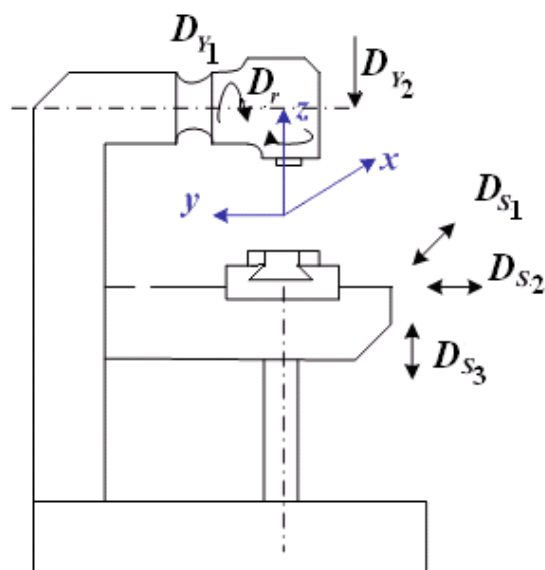


Рис. 5.12. Компоновка станка

Вводим символы:

$X, Y, Z$  – технологические перемещения вдоль соответствующих осей;

$A, B, C$  – технологические повороты вокруг осей  $X, Y, Z$ ;

$x, y, z$  – дополнительные перемещения вдоль  $X, Y, Z$ ;

$a, b, c$  – дополнительные повороты вокруг  $X, Y, Z$ ;

$O$  – базовая деталь.

Индексы:

– *верхние*:

$m$  – инструментальный магазин (накопитель инструментов);

$\wedge$  – признак главного движения;

– *нижние*:

$h$  – горизонтальный шпиндель;

$\vartheta$  – вертикальный шпиндель.

Записываем символьный код станка (от заготовки к инструменту):

$XYZO b z \hat{C}_9$ .

Меняем местами полученные символы:

$b Y X z O Z \hat{C}_9$ .

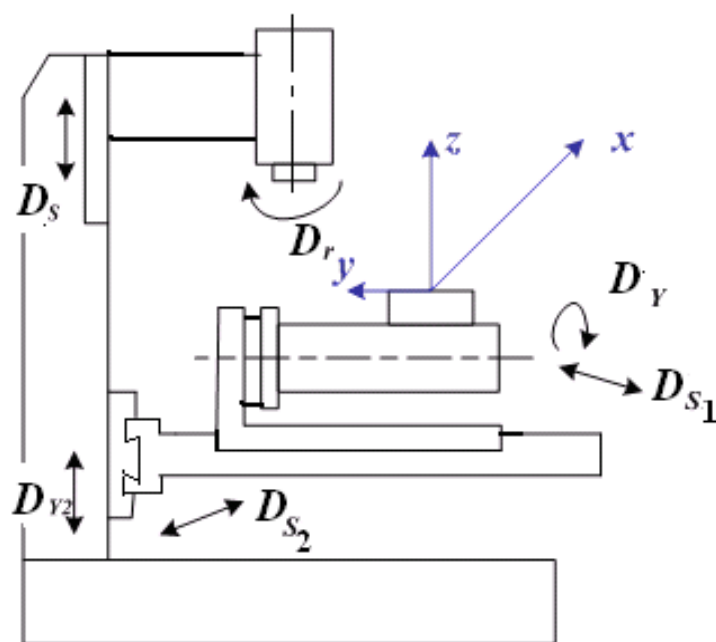


Рис. 5.13. Компоновка станка

По полученному коду создаем новую компоновку станка (рис. 5.13).

#### 5.6.4. Метод системного анализа

Термин *система* произошел от греч. *systema* – составленное из частей, соединение. Научный термин «система» является абстрактным понятием, введенным для обозначения разных объектов, выделения их из окружающей среды и исследования.

*Система* – совокупность взаимосвязанных компонентов (элементов), характеризующаяся постоянством определенных связей и их устойчивостью. Компоненты и связи характеризуются определенными свойствами, которые определяют свойства системы в целом. В приведенном определении системы под постоянством понимают тот факт, что свойства компонентов и связей сохраняются в определенном интервале времени, а под устойчивостью – что свойства компонентов и связей, а также системы в целом не изменяются под воздействием на систему некоторых возмущающих факторов.

Искусственные объекты создаются человеком для удовлетворения каких-либо потребностей.

*Техническая система* (ТС) – искусственно созданная система, предназначенная для удовлетворения определенных потребностей и состоящая из технических компонентов. Например, двигатель, станок, авторучка и т. д.

В компоненты *социотехнических систем* (организационно-технических) включают человека или коллективы людей, например, цех, отдел, фирма.

*Абстрактная система* – некоторая обобщенная модель, характеризующая определенные свойства некоторого объекта, которая получена в результате отвлечения (идеализирующая или изолирующая абстракция) рассматриваемых свойств от объектов-носителей этих свойств. Компонентами абстрактных систем являются абстрактные понятия. Например, абстрактами объектами в математике и геометрии являются: система уравнений, матрица, треугольник и др.

Системный подход предусматривает декомпозицию (деление) объекта на компоненты и исследование его структуры.

Объединение компонентов в систему приводит к появлению новых системных свойств, так называемого *синергетического* (греч. *synergos* – совместно действующий) эффекта.

Различают два вида проявления синергетического эффекта:

1) *системный эффект* – непропорционально большое изменение (усиление, увеличение или уменьшение) свойств, которые имеются у компонентов. Например, биметаллическая пластинка значитель-

но сильнее изменяет свою форму при изменении температуры, чем каждая из ее составляющих в отдельности;

2) *системное качество* – появление нового свойства, которым не обладает ни один из компонентов. В литературе встречается термин эмерджентность (англ. *emergence* – возникновение, появление нового) системы. Например, поместив свинцовую и цинковую пластинки в серную кислоту, получим гальванический элемент или, объединив в замкнутую электрическую цепь емкость и индуктивность, получим колебательный контур.

*Системные свойства объекта зависят от его структуры, т. е. от состава компонентов и характера связей между ними.*

Система обладает системными свойствами, которые невозможно обнаружить в ее компонентах. Разобрав станок на шестерни и валы, мы не поймем принцип его работы.

**Пример 38.** *Дюралюминий – сплав повышенной прочности.* В 1909–1911 гг. немецкий ученый А. Вильм установил, что сплав алюминия с добавкой 4 % меди, 0,5 % магния и 0,5 % марганца после резкого охлаждения (температура закалки 500 °С), находясь при комнатной температуре в течение 4–5 суток, постепенно становится более твердым и прочным [11]. Обнаруженное старение алюминиевого сплава позволило повысить прочность дюралюминия до 360...380 МПа (36...38 кг/мм<sup>2</sup>) вместо 70...80 МПа (7...8 кг/мм<sup>2</sup>) у чистого алюминия.

При создании ТО системный эффект получают, применяя следующие приемы:

– объединение в систему *однородных компонентов*, например: железнодорожный состав, велосипедная цепь, шарики в шарикоподшипнике, двух-, трех- и четырехмоторные самолеты, люстра с несколькими лампочками, сеть персональных ЭВМ и т. д.;

– объединение в систему *разнородных компонентов*, например циркуль «козья ножка», <ЭВМ – принтер – модем>, <магнитофон – радиоприемник> и т. д.;

– объединение в систему компонентов с *противоположными свойствами*, например: карандаш с ластиком, многослойная печатная плата (объединение проводящих и диэлектрических слоев) и т. д.;

– объединение в систему компонентов со *смещенными характеристиками*, например: биметаллическая пластика, набор гаечных ключей, объединение полупроводников с *n*- и *p*-проводимостью (полупроводниковый диод), набор карандашей, набор сверл, металлорежущее оборудование в цехе, бифокальные очки и т. д.

**Пример 39.** В штангенциркуле объединили две шкалы со смещенными характеристиками – в подвижной шкале 10 штрихов на отрезке 9 мм. В результате точность измерения увеличилась на порядок (рис. 5.14).

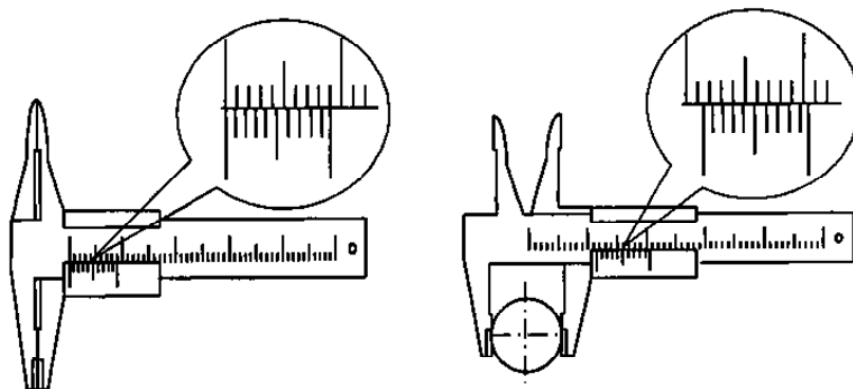


Рис. 5.14. Пример объединения компонентов со смещенными характеристиками

**Пример 40.** Уравнение – это система. Уравнение  $y = 5x - 3$  можно рассматривать как систему, состоящую из двух компонентов –  $x$  и  $y$ , которые связаны видом отношения – знаком равенства и арифметическими действиями. Эта связь определяет системное свойство – геометрическое место точек на плоскости, расположенных на одной прямой.

Если каждое из выражений  $y = 5x - 3$ ;  $y = x + 1$  рассматривать как уравнение прямой, то при объединении этих выражений в систему:

$$\begin{cases} y = 5x - 3; \\ y = x + 1 \end{cases}$$

задается связь между ними. Очевидно, что если система из двух линейных уравнений имеет решение, то она определяет уже другой объект – точку пересечения прямых. Объединение двух систем (уравнений) привело к появлению нового системного свойства.

**Пример 41.** Усилитель сигнала. Рассмотрим усилитель (рис. 5.15). Если сигнал на входе в усилитель нестабильно изменяется, то для разомкнутой системы (рис. 5.15, а) эта нестабильность будет усиливаться.

Если с выхода усилителя подать инвертированный сигнал на вход усилителя, т. е. организовать отрицательную обратную связь, то получим автоматический регулятор усиления (рис. 5.15, б). Если на вход подать положительный сигнал с выхода усилителя, то получим генератор электрических сигналов (рис. 5.15, в).

В связях отражаются различные виды взаимодействия компонентов между собой. В зависимости от моделируемого объекта связи могут быть конструктивными, функциональными, физическими, причинно-следственными и др.

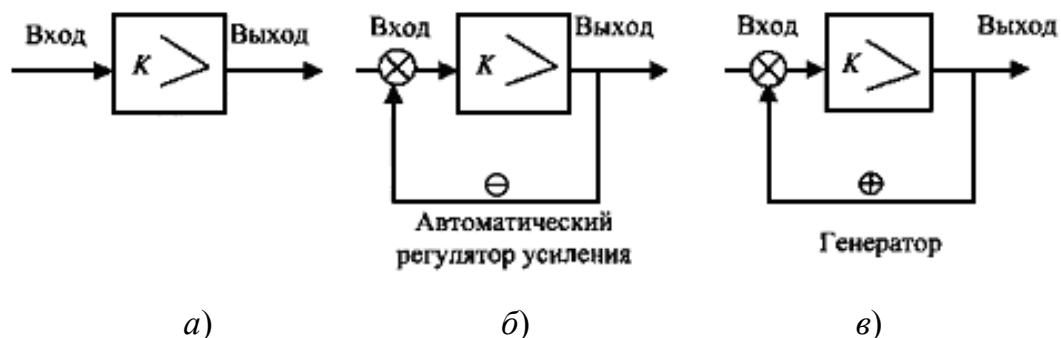


Рис. 5.15. Пример введения обратных связей в усилитель:

*a* – разомкнутая; *б* – с отрицательной обратной связью; *в* – с положительной обратной связью; *K* – коэффициент усиления

**Пример 42.** Определить площадь между двумя окружностями. Окружности концентрические и известна хорда  $L$ , являющаяся касательной к внутренней окружности (рис. 5.16, *a*).

В условии задачи описана система, состоящая из трех компонентов (две окружности и хорда), которые имеют три связи (рис. 5.16, *б*):

- 1) окружности имеют общий центр – концентрические окружности;
- 2) отрезок  $L$  является касательной к малой окружности;
- 3) отрезок  $L$  является хордой к большой окружности.

Площади кругов определяются через их радиусы. Если в задачу вводить компоненты, то они должны быть связаны с имеющимися компонентами. Радиусы надо ввести так, чтобы они связывали имеющиеся компоненты (рис. 5.16, *в*).

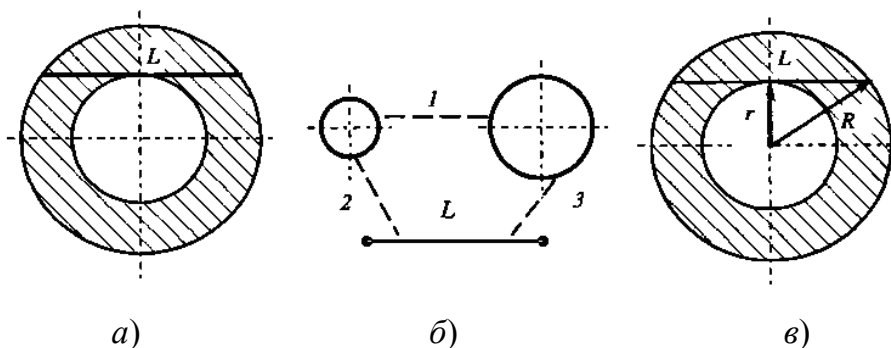


Рис. 5.16. Схема решения задачи к примеру 42:

*a* – ИД; *б* – модель системы: 1, 2, 3 – связи между компонентами; *в* – введение в исходную систему компонентов  $R$  и  $r$



Задача легко решается, если построить треугольник, т. е. ввести в систему еще один компонент, и применить теорему Пифагора:

$$\frac{L^2}{4} = R^2 - r^2.$$

Заштрихованная площадь определяется как разность площадей большого и малого кругов. Умножив последнее уравнение на  $\pi$ , получим:

$$\pi \frac{L^2}{4} = \pi R^2 - \pi r^2.$$

Уменьшим диаметр внутренней окружности, сохранив связи между компонентами и величину отрезка  $L$  (рис. 5.17, а, б). Посмотрим, что произойдет, если она выродится в точку (рис. 5.17, в).

Площадь малого круга равна нулю ( $r = 0$ ), но как компонент системы он все равно остался. Следовательно, осталось и системное свойство, что заштрихованная площадь по-прежнему определяется как разность площадей большого и малого кругов. На рис. 5.17, в видно, что  $S = \pi \frac{L^2}{4}$ .

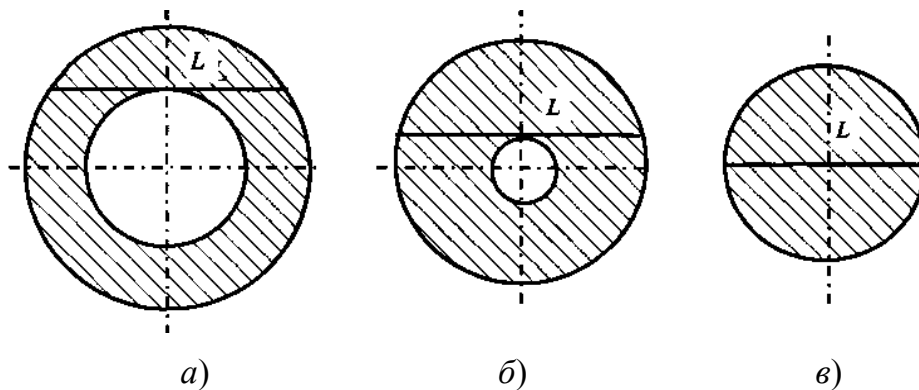


Рис. 5.17. Использование приема количественного изменения в компонентах:

а – исходное построение; б – уменьшим диаметр малого круга;  
в – диаметр малого круга равен нулю

**Пример 43.** Определить положение центра тяжести пластинки. В однородной круглой пластинке радиусом  $R$  вырезано квадратное отверстие (рис. 5.18).

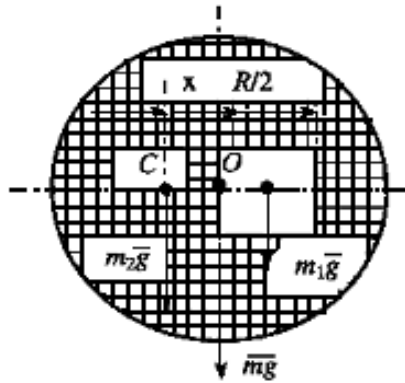


Рис. 5.18. Условия задачи

Расположим пластинку так, чтобы ось симметрии была горизонтальна, и введем гравитационное поле. В отверстие вставим квадрат из того же материала, что и заданный объект. Таким образом, добавили компонент. Получилась новая система, центр тяжести которой расположен в центре окружности.

Теперь для созданной системы можно составить уравнение равновесия. Сумма моментов всех сил относительно оси, проходящей через точку  $O$ , равна нулю:

$$m_1 g \frac{1}{4} R - m_2 g x = 0,$$

где  $m_1 g$  – сила тяжести, приложенная в центре квадрата;  $m_2 g$  – сила тяжести, действующая на пластинку с отверстием и приложенная в искомом центре тяжести  $C$ .

Отсюда следует, что  $x = \frac{m_1 R}{4m_2}$ .

Как и в предыдущих примерах, прием, основанный на системном подходе, не только дает объяснение приведенного решения, но и способствует формированию системного мышления, ориентирует сначала на поиск приема для нахождения плана решения задачи, а уж затем на поиск конкретного воплощения найденного приема.

### 5.6.5. Фразеологические методы

*Троп* (греч. *tropos*) – это слово или фраза в переносном значении, образное выражение (метафора, метонимия, синекдоха, аллегория, гиперболы, литота и др.) [12], [13].

*Метонимия* (греч. *metonymia* – переименование) – оборот речи, в котором одно слово заменяется другим на основании смежности

двух понятий, например: *лес поет* вместо *в лесу поют птицы*; *паять микросхемы* вместо *припаивать выводы микросхем к контактным площадкам* и т. п.

*Синекдоха* (греч. *synekdoche*) – стилистический оборот, вид метонимии, состоящий в употреблении большего вместо меньшего, целого вместо части, общего вместо частного, например, *пайка печатной платы* (хотя пропаяно одно соединение). Или наоборот, меньшего вместо большего, например, *выходной контроль изделий* – на самом деле может быть несколько видов контроля. Этот оборот речи помогает отделить общее от частного, сознательно сфокусировать внимание на требуемом уровне членения технической системы.

*Аллегория* (греч. *allegoria* – иносказание); в искусстве этим тропом выражают отвлеченные понятия при помощи конкретного образа, например: *ключ* – аллегория найденного решения задачи (создание безотходных технологий – *ключ* к решению экологических проблем; оптоэлектроника – *ключ* к созданию помехоустойчивых систем связи).

В настоящее время, благодаря кинематографу, появилась новая аллегория – матрица. Она означает жесткое управление всей жизнью человека, его полный контроль, невозможность вырваться из отведенной ему ячейки общества.

*Олицетворение* – один из тропов, который широко используется как в художественных произведениях, так и в научных трудах. Олицетворение – воплощение объекта в образе живого существа, наделение предметов признаками и способностями человека. Примеры: *звезда со звездой говорит, упала тишина, время лечит, рентген показал, болезнь ушла, проблема встала во весь рост, машина любит уход, умная техника, послушная техника, приборы помогают измерить характеристики, компьютер думает* и т. п.

Данный троп полезно применять и для создания субъективных (личных) аналогий, потому, что при использовании олицетворения автоматически работает эмпатия – человек ставит себя на место проблемной части технологического объекта, например: *у самолета есть «мозг» – управляющая электроника, «сердце» – моторы, «глаза» – радары, антенны, «пища» – топливо, «скелет» – несущий каркас и т. д.* – все, как у человека.

*Гипербола* (греч. *hyperbola* – переход, перевес, преувеличение) – оборот речи, состоящий в чрезмерном преувеличении для более сильного впечатления, например: *бесконечный поток информации, ходить по ниточке, вытянуться в струнку, подпрыгнуть до неба*.

*Литота* (греч. *litotes* – простота) – оборот речи, обратный гиперболе – преуменьшение, например, *съела крошечку, капельку выпила, ростом с цыпленка*, либо замена какого-либо выражения другим, поставленным в отрицательной форме, например, вместо *хорошо* – *неплохо*, вместо *дешево* – *недорого*.

*Метафора* (греч. *metaphora*) – оборот речи, состоящий в употреблении слов или выражений в переносном смысле на основе какой-либо аналогии, сходства, сравнения. Это образное выражение, иносказание, связанное с перенесением на рассматриваемый предмет (явление) характерных признаков другого предмета (явления). Для большей образности перенос значения основан не только на сходстве, но и на контрасте.

Часто новому открытому объекту или явлению дают метафорическое название, которое затем закрепляется как технический термин (табл. 5.9). Метафорическое название очень точно отражает проблему, тему, характеризует объект, а иногда даже точнее, чем общепринятый технический термин. Например: *горячие кнопки, горячий, холодный, ждущий резерв* (в теории надежности), *живая и мертвая вода* (это понятнее, чем катионит и анионит), *цепная реакция* и т. п.

Таблица 5.9

#### Примеры технических терминов, образованных на основе метафор

Технический термин	Прототип	Что обозначает	Признак сходства
<i>Электронное облако</i>	Облако атмосферное	Область, в которой сосредоточены электроны	Группа однородных частиц
<i>Гусеница трактора, танка</i>	Насекомое гусеница	Движитель для тяжелых транспортных средств повышенной проходимости	Последовательное перемещение сегментов опоры
<i>Маска</i>	Карнавальная маска	Защитное покрытие с отверстиями	Наличие функциональных отверстий
<i>Разводка печатных плат, микросхем</i>	Разводка караула на военной службе	Процесс формирования топологии печатной платы (микросхемы) из электрической схемы	Последовательное размещение объектов на позициях
<i>Сэндвич</i>	Ломти хлеба, чередующиеся с начинкой	Конструкция, состоящая из слоев различных материалов	Чередование разных слоев материала
<i>Хомутик</i>	Хомут на шее лошади	Обвязка в радиоэлектронике, деталь в механизме	Сходство по форме и функции
<i>Коромысло</i>	Палка с крючками на концах	Уравновешивающий элемент в механике	Сходство по форме и выполняемой операции, функции

Метафора отличается от простого сравнения тем, что при взаимодействии обозначаемого и образного объектов возникает системный эффект – иносказательность, появление переносного значения.

Конструирование метафор можно представить как ряд мыслительных операций.

На *первом этапе* происходит возникновение авторского замысла и поиск основания метафоры – объекта, позволяющего автору выразить свою идею и скрытые интересы, например: *Россия – это компьютер*.

На *втором этапе* осуществляется выбор вспомогательного образного предмета. Здесь и возникает основное затруднение: с чем сравнивать основание метафоры? Какое ввести допущение? В каком слове найти потенциально заложенную силу, разрушающую грани невозможного, способную приблизить далекое и возвысить обыденное, рассказать о нем новым, необычным способом? Именно вспомогательный предмет через возможность допущения «как если бы» пробуждает в сознании образно-ассоциативные комплексы. *Для нормальной работы компьютера необходимо программное обеспечение. А что нужно для нормальной жизни в России?*

*Третий этап* – синтез: создание в воображении идеальной реальности в целях получения нового смыслового результата с многоплановыми ассоциациями: «*Россия похожа на компьютер, в который не загружается программа*»\* (автор метафоры – Глеб Павловский).

По способу образования можно выделить следующие основные группы языковых метафор:

- *Образная* метафора появляется вследствие перехода многопризнакового, описательного значения в суждение о предмете (характеризующее его свойства) и служит для поиска новых синонимов для его описания, например: *тяжелая вода, усталостная трещина, полновесная аргументация, тяжелая фраза, падающий червяк*.

- *Номинативная* метафора образуется при переносе названия, замене одного описательного значения другим и служит источником омонимии, например: *коробка передач, червяк в передаче, кулачок в механизме*.

- *Когнитивная* метафора возникает в результате сдвига в сочетаемости предикатных (признаковых) слов (прилагательных и глаголов). Она создает полисемию (многозначность), например: *жесткая закономерность, мягкий подход, расплывчатая мысль*.

- *Генерализирующая* метафора стирает границы в значении слова между логическими порядками и весьма часто является конечным

результатом когнитивной метафоры. Она формирует предикаты общего значения, например: *провести исследование, метод конечных элементов, конечные разности*.

В зависимости от того, как одно понятие упорядочивается либо организуется в другом понятии, с которым оно сопоставляется, различают три вида метафор.

*Структурные* метафоры – одно понятие структурно-метафорически упорядочивается в терминах другого, например: *идеи – двигатель прогресса, дети – цветы жизни, каркас – скелет здания*.

*Ориентационные* метафоры характеризуют связи понятий с пространственной или временной ориентацией, например: *верх наглости, вникнуть в глубину проблемы, преодолеть барьер противоречий*.

Метафоры *сущности* и *субстанций* помогают осмыслить опыт в терминах уже освоенных объектов и веществ. Можно выделить разные способы употребления таких метафор:

- способ обозначения: *боязнь высоты, нежелание понять*;
- количественная характеристика: *много энергии, огромный объем информации*;
- выделение аспектов: *темп современной жизни, скоротечность времени*;
- определение причин: *груз обязанностей, давление обстоятельств*;
- постановка цели и мотивирование действий: *найти виновника, справиться с проблемой, добить задачу*;
- метафоры, связанные с вместилищем: *поле зрения, участвовать в теме, впасть в немилость, выйти из ступора, вписаться в поворот, выйти из себя*.

Часто метафоры порождают самые обыденные объекты. Окна домов дали идею «*окон*» Windows. Иногда для обозначения сложных явлений параллельно существуют научные термины и соответствующие им метафоры, например: ригидный – «*тормоз*», экстраверт – «*душа нараспашку*», интроверт – «*себе на уме*». Три слова «*карта не есть территория*» позволяют отразить тот факт, что любое описание объекта не будет абсолютно полным. Все это подтверждает огромный продуктивный потенциал метафор для решения проблем.

Некоторые игры явились источником ряда метафор, например, игры в шашки и шахматы. «*Разменять фигуры*» может означать эквивалентный обмен. Часто применяется шахматная метафора «*ход конем*». Она означает отклонение от линейного, предсказуемого поведения, возникновение неожиданного хода событий.

К символическим аналогиям относится также оксюморон (греч. *oksumoron* – остроумно-глупое) – стилистический оборот речи, в котором сочетаются семантически контрастные слова, создающие неожиданное смысловое содержание; парадоксальное объединение понятий, относящихся к одному объекту, например: *слепящая мгла, холодный кипяток, сладкая горечь, невидимый свет, неслышимый звук*.

Цель оксюморона – обнаружить в привычном парадокс, неясность, противоречие.

**Пример 44.** Оксюмороны для ТО:

Шлифовальный круг – *точная шероховатость*.

Храповый механизм – *надежная прерывистость*.

Автомобильная свеча – *послушная молния*.

Прочность – *принудительная целостность*.

Инфракрасная оптика – *зрячий слепец*.

Множество – *благоразумная ограниченность*.

*Психологические предпосылки синектического подхода* базируются на особенностях функционирования мозга человека. Левое полушарие обрабатывает данные последовательно. Оно лучше всего оперирует с логическими, словесными и аналитическими категориями. Это прямой (рациональный) и относительно медленный способ мышления.

Правое полушарие охватывает проблему в целом и обрабатывает информацию одновременно в различных аспектах. Правополушарное мышление оперирует образами, метафорами, смыслами, отвечает за интуицию. Это косвенный (иррациональный) и очень быстрый (практически мгновенный) способ мышления.

Между полушариями имеются связи, и чем больше связей, тем эффективнее мыслительный процесс.

Использование *прямой аналогии* преимущественно способствует активизации *левого полушария*, которое осуществляет отбор, сравнение, систематизацию и экспертизу признаков сопоставляемых объектов.

*Личная, фантастическая и символическая аналогии* активизируют преимущественно *правополушарное мышление*. В процессе сопоставления открытые (перцептивные) признаки объекта по мере трансформации видения проблемы (образа проблемы) сменяются неочевидными (латентными, скрытыми) признаками, т. е. описание объектов в терминах рассматриваемой предметной области преобразуется в контекст образных понятий.

То, что выглядит как хаотический перебор вариантов, на самом деле есть проявление эмерджентности, всплывание, вспоминание

и т. п. Этот способ мышления иногда называют «*путь наука*» – знание из себя (в отличие от процесса последовательного сбора информации, накопления знаний и их систематизации, которые определяют как «*путь пчелы*»).

#### **5.6.6. Метод превращения незнакомого в знакомое и наоборот**

Синектика включает в себя два мыслительных процесса, постоянно воспроизводимых на всех этапах работы: превращение незнакомого в знакомое и превращение знакомого в незнакомое.

*Превращение незнакомого в знакомое* заключается в том, что новое неизвестное содержание (сущность, объект, процесс) рассматривается в известном (знакомом) контексте. Например, термическое осаждение металлических пленок похоже на осаждение паров кипящей воды на холодном блюде, ионное травление похоже на пескоструйную обработку; процесс решения задачи напоминает постройку дома: сначала закладывают фундамент, привозят материалы, возводят стены, устанавливают крышу, затем производится внутренняя отделка.

*Превращение знакомого в незнакомое* заключается в том, что известное (знакомое) содержание, рассматривается в новых (незнакомых) контекстах. Например, все возможные применения скрепки: электрическая перемычка, подпорка для цветка, цепочка, рыболовный крючок и т. п. Такой подход позволяет выявлять новые качества объекта и его новые возможные связи.

**Пример 45.** *Возникновение и развитие электроэрозионной обработки.* Возникающие между электрическими контактами дуга и искра ведут себя по-разному относительно анода и катода. Если дуга разрушает катод, то искра обладает противоположным действием – разрушает анод. Кроме того, удалось установить, что интенсивностью разрушения любого из контактов можно легко управлять, изменяя емкости колебательного контура. С увеличением емкости подключаемых конденсаторов уменьшается дуга и ярче, сильнее становится искра. При превращении дугового разряда в искровой происходит перенос частиц материала анода на катод.

Исследования под микроскопом показали, что жидкость содержит микронные шарики из материала анода. Таким образом, искра превратилась в инструмент для изготовления тончайшего металлического порошка.



Благодаря обнаруженному явлению удалось создать первую лабораторную установку производительностью около 700 г металлического порошка в сутки.

Вредное явление – эрозия контактов – обратилось в полезное!

Затем была поставлена задача увеличения скорости разрушения электрода и повышения производительности процесса для получения порошка, т. е. задача противоположная по своей сути исходной.

Далее, было обнаружено, что при более жестких электрических режимах, выбранных для интенсификации процесса получения порошков, квадратный электрод-катод «прошил» насквозь металлическую пластину электрода-анода.

Благодаря высокой плотности энергии, достигающей до 30000 Дж/мм<sup>2</sup>, в зоне канала разряда при электроискровой обработке развиваются температуры порядка 10000 °С, при которых любые материалы молниеносно плавятся и испаряются. Поскольку длительность искрового разряда очень мала, то высокие температуры локализуются в микрообъеме поверхностных слоев детали анода.

В 1951–1953 гг. были разработаны специальные генераторы импульсов с использованием машинных генераторов, электронных ламп, ионных приборов, диодов и транзисторов. Применение разнообразных генераторов импульсов, независимых от свойств среды, позволило увеличить снимаемый слой металла по сравнению с электроискровой схемой обработки более чем в 10 раз и довести производительность до 10<sup>3</sup>...10<sup>4</sup> мм<sup>3</sup>/мин при значительно меньшем износе инструмента и расходе электроэнергии.

**Пример 46.** *Заслонка для регулирования потока пульпы.* Поиск конструкции заслонки для регулирования потока пульпы начали с конструирования метафор. Получили следующий набор: *живая броня, невидимая кольчуга, бессменная пленка, отрастающий панцирь.* Последняя аналогия подсказала идею технического решения и была поставлена задача: как сделать так, чтобы на поверхности заслонки все время нарастал защитный слой? изнашивается и нарастает.

В результате было получено техническое решение: подавать к заслонке охлаждающий агрегат – она будет покрываться слоем льда, предохраняющим от истирания и восстанавливающимся по мере разрушения.

В настоящее время разработаны разные рекомендации по формированию метафор [12], [13]. Один из способов предполагает помещение своей идеи или проблемы в параллельную сферу деятельности. Так,

слова «творческая кухня» могут относиться не только к приготовлению пищи, но и к химической лаборатории или к механической мастерской.

**Пример 47.** Перед технологом возникла задача: как при изготовлении детали удалить заусенец, образующийся после сверления отверстия  $\varnothing 2$  мм, которое выходит в канавку, и как контролировать его отсутствие (рис. 5.19)? Образование заусенца обусловлено вязкостью материала детали.

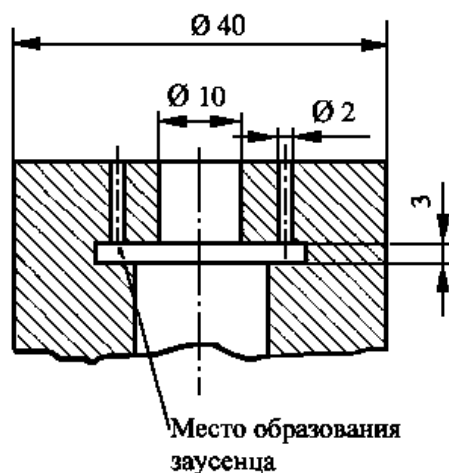


Рис. 5.19. Фрагмент детали

Анализ может привести к постановке еще двух задач: как сделать так, чтобы заусенец не образовывался? Какую функцию выполняет это отверстие и можно ли изменить конструкцию детали таким образом, чтобы требуемая функция выполнялась, а отверстия, которое выходило бы в канавку, не было.

Чтобы получить расширенное представление о множестве аспектов задачи, можно предположить, что деталь сделана из очень пластичного вязкого материала. Это может быть, например, пластилин, сливочный крем, масло и т. п. Можно также представить деталь, выполненную из слоистого материала (асбест, слюда), в которых также появятся заусенцы от сверления. Однако природа причин образования заусенцев разная.

Затем ведется генерирование идей. Используются различные виды аналогий.

В итоге сопоставляют выявленные в процессе генерирования идеи с ПКП. Важным элементом этого этапа является критическая оценка идей. На этом этапе выясняется истинная потребность заказчика.

**Пример 48.** Усовершенствование технологии поверхностного монтажа. Технология поверхностного монтажа заключается в уста-

новке чаще всего плоских электронных компонентов на поверхность печатной платы без использования монтажных отверстий (рис. 5.20).

Поверхностно монтируемые элементы либо не имеют выводов вообще, либо эти выводы расположены по бокам и под корпусом элемента. На плате располагается большое количество типоминиатюр, и они имеют малые размеры.

В современной технологии поверхностного монтажа имеется ряд нерешенных проблем, препятствующих ее дальнейшему улучшению. Например, при пайке в инфракрасной печи второй стороны электронного узла, показанного на рис. 5.20, происходит расплавление паяных соединений первой стороны платы, спаянной ранее. При этом отваливается часть компонентов. Есть проблемы по нанесению припойной пасты, точному позиционированию элементов относительно контактных площадок и др.

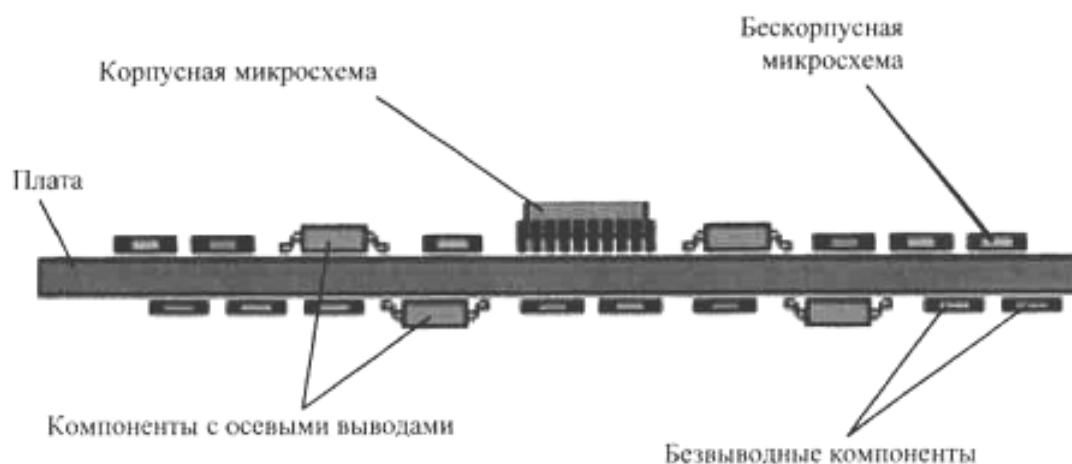


Рис. 5.20. Двухсторонний поверхностный монтаж

Одна из сложностей монтажа – для экономии места выводы изготавливают на корпусе или под корпусом радиоэлемента, но при этом затрудняется доступ к контактным площадкам и сложно осуществить надежную пайку элементов на плату. Требуется разработать такие конструкторско-технологические решения, которые обеспечат качественный монтаж и пайку элементной базы, высокую надежность, производительность и гибкость технологии.

*Шаг 1.* Исследование проблемы в том виде, как она сформулирована заказчиком. Выделить значимые факторы, участвующие в описании проблемы. Составить перечень факторов, соответствующих существующей ситуации, затем – желаемой ситуации.

*Шаг 2.* Интерпретация проблемы в знакомую ситуацию с помощью метафор (например, «Уборка в доме», «Приготовление обеда», «Постройка дома», «Уход за домашними животными» и т. п.).

Выбирают вид деятельности и составляют перечень в терминах выбранного процесса. Например, «Готовят обед»: берут различные продукты, моют их, режут, некоторые смешивают друг с другом, варят (жарят) и ставят на стол в определенном порядке (почти технология сборки печатных плат).

*Шаг 3.* Получение первых решений: разработка вариантов технологических операций.

Обезжиривают в растворителях электрорадиоэлементы, сортируют их по корпусам. Помещают в групповое приспособление, подвергают лужению. На плату по трафарету наносят припойную пасту. Радиоэлементы устанавливают на плату, совмещая их с контактными площадками. Нагревают в инфракрасной печи для расплавления припоя.

Необходимо выработать оптимальный порядок последовательного размещения электрорадиоэлементов и пайки. Можно смешивать разные электрорадиоэлементы, выполненные в одних и тех же типах корпусов.

Анализ тривиальности решений и последовательный отказ от них: требуется много приспособлений – по числу типоминалов корпусов, не избежать перегрева элементов, не решена задача точного позиционирования по контактными площадкам.

*Шаг 4.* Переформулирование исходной задачи, как ее понимают в нетривиальном аспекте. Для полного раскрытия смысла задачи составляются метафоры, например: *змея, кусающая себя за хвост, превращение гусеницы в бабочку, паук в паутине* и т. п.

*Шаг 5.* Первый цикл поиска аналогий. Дать ответы на вопросы, приводящие к нахождению аналогий, помогающих решить проблему.

Охарактеризовать проблему с помощью набора оксюморонов (например, придумать название книги, детально описывающей исследуемую проблему). Например: *неподвижная подвижность, привязанный бегун, прикованная ртуть*.

*Шаг 6.* Развитие аналогий. Все полученные на предыдущем шаге аналогии внимательно рассматривают применительно к задаче, выявляют различные варианты их значений.

*Шаг 7.* Практическая адаптация аналогий. Сопоставление выработанных аналогий с первоначальной формулировкой задачи (проблема, как она дана) и с выработанной на 4 шаге формулировкой (проблема, как ее понимают). Составление списка идей, связанных с решением задачи, с необходимыми для этого ресурсами и контекстом.

*Шаг 8.* Выбор наиболее приемлемых вариантов, развитие идей. Если идеи оказываются знакомыми, добиться их реализации незнакомым путем.

*Шаг 9.* Второй цикл поиска аналогий. Дать ответы на вопросы, приводящие к нахождению аналогий, помогающих решить проблему.

Процесс повторяется снова и снова, пока не будет получен положительный результат. Об окончании процесса судят по чувству глубокого удовлетворения, интуитивной уверенности в получении приемлемого результата и ощущению комфорта.

*Шаг 10.* При необходимости возвращение к исходной формулировке проблемы и ответы на вопросы, приводящие к появлению аналогий.

*Шаг 11.* Новая формулировка проблемы, как ее понимают, и повторение процесса поиска на шагах 1, 2, 6, 7.

### **5.6.7. Морфологический подход к анализу и синтезу объектов**

Морфология (от греч. *morphe* форма + *logos* слово, понятие, учение) – наука, изучающая форму и строение различных систем.

Морфологический подход используют для наиболее полного исследования проблемы и выявления поля наиболее возможных вариантов ее решения.

В самом общем виде морфологический подход предусматривает совместное использование логической операции деления понятий, которое лежит в основе классифицирования объектов, и трех типовых операций мышления: изолирующей абстракции, анализа и синтеза.

Известный психолингвист Дж. Миллер в конце 60-х гг. XX в. выдвинул гипотезу о том, что модели в виде классификаций способствуют выявлению внутренних семантических (смысловых) связей структурированного объекта.

В работах Ф. Цвикки представлено около семи вариантов морфологического исследования. Далее рассматриваются два метода: морфологического ящика (МЯ) и отрицания и конструирования (МОК).

Морфологическая таблица (МТ) дает более удобный для визуального изучения графический образ вариантов решений, чем МЯ. Кроме того, если количество признаков деления более трех, то МЯ уже не построишь, а в МТ можно вносить практически неограниченное количество признаков (табл. 5.10).

Формирование МТ можно осуществлять с позиций операционного и предметного подхода.

*Операционный подход* ориентирован на формирование способов получения полезного действия, поиска возможных операций для выполнения полезной функции, выбора некоторых процедур. В заголовках МТ вносятся действия, операции по изменению анализируемой ТС, например: способы выполнения функции, направления и характер движения, объединение или разделение функций рассматриваемых компонентов ТС и т. д.

При *предметном подходе* в заголовки МТ вносятся свойства, признаки рассматриваемого предмета: обобщенные наименования свойств компонентов рассматриваемой ТС, например: расположение компонентов в пространстве, материал конструкции, виды соединений, форма и другие конструктивные признаки.

Таблица 5.10

**Морфологическая таблица задач по организации безотходного производства**

Задачи	Мероприятия по поиску ресурсов	Возможные физические операции
1. Создать безотходную технологию производства. 2. Создать технологию выработки полезного продукта из отходов производства. 3. Создать технологию уничтожения отходов производства	1. Изменить форму и качество материала основного продукта. 2. Изменить форму и качество технологических материалов и сред. 3. Изменить форму и качество отходов. 4. Изменить технологическое оборудование	1. Процессы резания (сверление, раскрой, вырубка и т. п.). 2. Технологии пластического формообразования (штамповка, литье, экструзия и т. п.). 3. Ультразвуковые технологии (ультразвуковая размерная обработка, ультразвуковая очистка и т. п.). 4. Электрохимические технологии (химическое осаждение, гальваностегия, гальванопластика и т. п.). 5. Электрофизические технологии (электроискровые, лазерные, плазменные, электронно-лучевые и т. п.)

**Методика разработки морфологических таблиц.** Если возникают проблемы с выявлением признаков при формировании заголовка МТ, можно воспользоваться следующими рекомендациями.

В результате проведенного функционального анализа синтезируется некоторая структура ТС, определяются требуемые физические операции, которые должны выполнять ее компоненты. Осуществляется поиск ресурсов. Найденные ресурсы, как правило, приводят к появлению противоречий. После определения способа их разрешения осуществляется поиск ресурсов для разрешения противоречий.

Формирование возможных вариантов ТО можно осуществить по следующим направлениям:

1. Структурные изменения исходной модели ТО – ориентировка на получение системного эффекта:

1.1) разделить функциональный компонент, выполняющий несколько функций, на ряд функциональных компонентов;

1.2) передать некоторые функции от одного компонента другому или в НС;

1.3) упразднить некоторые функции;

1.4) изменить функциональные связи между компонентами.

2. Изменение конструктивных (основополагающих) решений функциональных компонентов:

2.1) изменить ФПД функционального компонента;

2.2) изменить временные характеристики выполнения ТО;

2.3) изменить количественные характеристики функциональных компонентов или связей.

3. Конструкторско-технологические изменения в ТО:

3.1) изменить взаимное расположение функциональных компонентов;

3.2) изменить положение в пространстве;

3.3) изменить форму;

3.4) изменить членение конструкции;

3.5) рассмотреть различные виды соединений;

3.6) изменить конструкционные материалы.

По этим направлениям формулируется признак (основание логического деления), который вносится в заголовок МТ.

Если МТ включает как операционный, так и предметный подходы, то предложения, внесенные в предметную часть МТ, будут зависеть от предложений, внесенных в операционную часть. Тогда количество возможных решений будет значительно меньше, чем произведение количества вариантов по каждому выделенному признаку. Это связано с тем, что некоторые свойства, записанные в предметной части, не могут быть реализованы для некоторых операций.

**Пример 49. Проектирование амортизатора.** Известно, что мягкие амортизаторы хорошо гасят вибрационные нагрузки, причем их собственная частота колебаний должна быть ниже, чем частоты, которые он должен подавлять (примерно в 1,5 раза). Жесткие (высокочастотные) амортизаторы в основном защищают от ударных нагрузок.

На частотные характеристики влияет не только жесткость материала, но и форма амортизатора. Причем варьированием формы конструкции можно в широком диапазоне изменять частотные характеристики амортизатора (рис. 5.21).

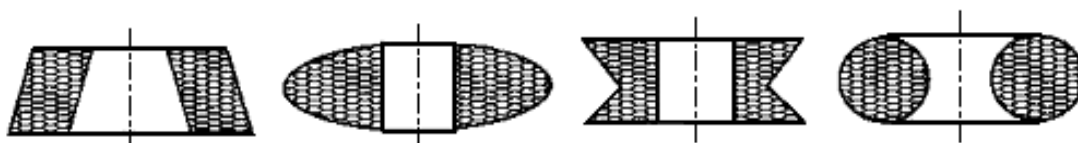


Рис. 5.21. Формы упругого элемента амортизатора

Исходя из опыта проектирования амортизаторов, в заголовок МТ можно внести следующие признаки упругого элемента (УЭ): А – форма торцов; Б – вид образующей внешнего диаметра; В – вид образующей внутреннего диаметра; Г – материал; Д – конструктивные решения; Е – пространственная структура.

Варианты исполнения формы УЭ можно описать словами: прямая, ступенчатая, наклонная, пилообразная, выпуклая, вогнутая, клиновидная, с выступами. Упругие элементы можно выполнить из различных упругих материалов: резины, каучука, спрессованной пружинной проволоки (получившей название металлическая резина) и т. п. (табл. 5.11).

Таблица 5.11

**Морфологическая таблица решений упругого элемента амортизатора**

А – форма торцов	Б – образующая внешнего диаметра	В – образующая внутреннего диаметра	Г – материал	Д – конструктивные решения	Е – пространственная структура
Прямая	Прямая	Прямая	Силиконовая резина	Внешняя тонкая оболочка	Составленный из элементов
Выпуклая	Выпуклая	Выпуклая	Металлическая резина (МР)	Армированный упругими прокладками	Монолитный



<b>А – форма торцов</b>	<b>Б – образующая внешнего диаметра</b>	<b>В – образующая внутреннего диаметра</b>	<b>Г – материал</b>	<b>Д – конструктивные решения</b>	<b>Е – пространственная структура</b>
Наклонная	Наклонная	Наклонная	Синтетический каучук	Армированный тканью	Слоистый
Пилообразная	Пилообразная	Пилообразная	Пористый металл	Жесткие обкладки по торцам	Пористый
Ступенчатая	Ступенчатая	Ступенчатая	Композиционный материал	Составной различной упругости	Стержневой

Иногда может ставиться задача сокращения размерности МТ, например, чтобы сделать эту модель более обозримой. Здесь можно воспользоваться лингвистическим приемом – выбор терминов для обозначения признака, занесенного в заголовок МТ. Этот термин может определять либо качественное изменение признака, либо количественное его изменение и иметь различную степень обогащения.

Например, слово «выступ» обозначает выступающий элемент на одной из плоскостей УЭ, а слова «ступенчатый» или «пилообразный» – несколько выступов, в том числе и один. Слово «круглый» обозначает круглую поверхность, а слово «выпуклый» – круглую, эллиптическую, параболическую и т. п.

Выберем решение УЭ, характеризующееся первой строкой морфологической табл. 5.11: А1В1В1Г1Д1Е1. Получили упругий элемент в виде цилиндрической втулки, составленной из нескольких частей и помещенный в тонкую оболочку, для которого можно построить отдельную МТ, рассматривая возможные решения по трем признакам (табл. 5.12).

Таблица 5.12

**Углубленное исследование фрагмента морфологического множества для одной характеристики (упругий элемент без оболочки)**

<b>Ж – ориентация границ между элементами</b>	<b>З – жесткость составных частей</b>	<b>К – армирующие элементы</b>
Вертикальные границы	Одинаковая	Отсутствуют
Горизонтальные границы	Изменяется от оси УЭ к его образующей	Винтовые

Ж – ориентация границ между элементами	З – жесткость составных частей	К – армирующие элементы
Комбинированное расположение границ	Изменяется от оси УЭ	Объемные
Наклонные границы	Наличие частей с нулевой жесткостью	Контурные

Всего получилось  $3 \cdot 4 \cdot 2 = 24$  варианта структуры для упругой цилиндрической втулки. Выбранный ранее из основной МТ вариант (А1Б1В1Г1Д1Е1) может иметь разную структуру (рис. 5.22). При варианте Ж131К1 – это вложенные друг в друга кольцевые упругие элементы одинаковой плотности, не скрепленные между собой (рис. 5.22, а).

Другим вариантом структуры рассматриваемого УЭ может быть Ж232К2: кольцевые элементы одинакового диаметра, но разной плотности (упругости) расположены в виде стопки друг на друге и скреплены между собой армирующим пружинным элементом (например, прошиты проволокой), причем плотность кольцевых элементов меняется (увеличивается) от центральной части к торцам (рис. 5.22, б).

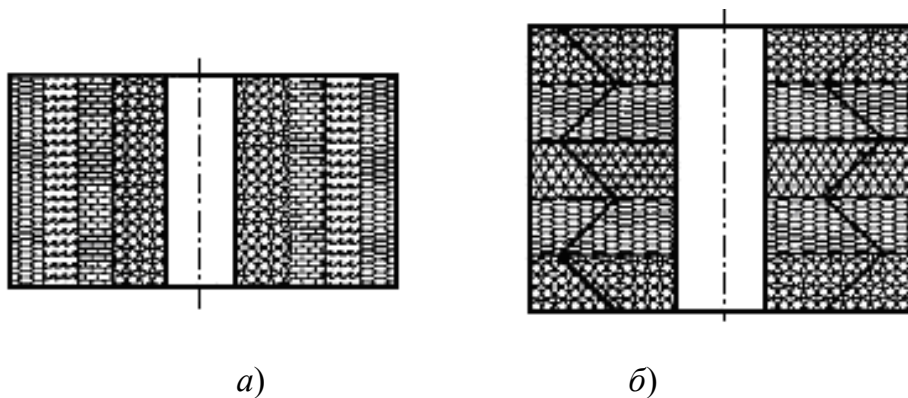


Рис. 5.22. Упругие элементы амортизатора:  
а – вариант Ж131К1; б – вариант Ж232К2

Теперь задача заключается в том, чтобы найти такое сочетание частных решений, которое позволит получить эффективное конструкторское решение. Следует отметить, что в результате синтеза конкретного решения всегда будет получаться некоторый системный эффект. Например, амортизатор (рис. 5.23) благодаря форме упругого элемента нелинейно изменяет свою жесткость. Внешняя динамическая нагрузка, действующая вдоль оси амортизатора, через опорные

шайбы передается на упругий элемент. При ударных осевых нагрузках рабочий зазор стремится к нулю и кольцевой выступ втулки обеспечивает скачкообразное изменение упругих свойств амортизатора, который становится существенно более жестким. Такими амортизаторами можно защитить аппаратуру и от вибраций, и от ударов.

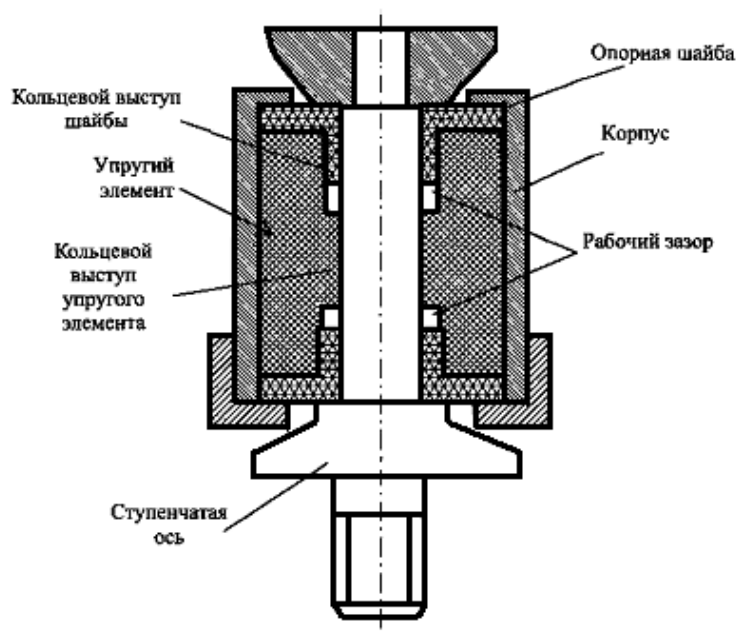


Рис. 5.23. Конструкция амортизатора

**Синтез технического решения с помощью морфологического метода.** Датой рождения современного морфологического анализа систем произвольной природы можно считать 1942 г. В это время вышла в свет первая работа известного швейцарского астрофизика Ф. Цвикки по морфологическому анализу реактивных двигателей с описанием его метода морфологического ящика. Ученому за короткое время удалось получить значительное количество оригинальных технических решений в ракетостроении, чем он очень удивил ведущих специалистов и руководителей американской фирмы «Аэроджет инжиниринг корпорейшн». Многие из предложенных решений были впоследствии реализованы, среди них, как оказалось позже, были решения, повторяющие немецкие ракеты ФАУ-1 и ФАУ-2.

Морфологический метод исследования был применен к целому ряду систем: по утверждению Ф. Цвикки, более 70 крупных промышленных фирм используют его при решении разнообразных научно-технических задач. Сам Ф. Цвикки создал серию оригинальных изобретений, в том числе баллистические устройства, оригинальные си-

ловые установки, взрывчатые вещества, способ комбинированной фотографии и т. д. [10].

Основное назначение морфологической таблицы – быть вспомогательным инструментом для последующего поиска решения задачи, т. е. быть вместилищем, полем всех мыслимых решений задачи, на котором осуществляется отбор наиболее перспективных, принципиально новых решений.

Метод пригоден для поиска принципиально новых решений, для прогнозирования путей развития технических и других систем.

Преимущества метода в том, что он облегчает учет важнейших направлений совершенствования объекта, систематизирует поиск нового технического решения. Основная трудность заключается в определении набора функций, которые были бы:

- 1) существенными для любого решения;
- 2) независимыми друг от друга;
- 3) охватывающими все аспекты проблемы;
- 4) достаточно немногочисленными, чтобы можно было составить матрицу, допускающую быстрое изучение.

При решении новых проблем, когда для выбора функций нельзя опереться ни на данные исследований, ни на практический опыт, перед проектировщиком стоит сложная задача уловить какую-то внутреннюю структуру в том, что существует пока только в его воображении. Морфологическую таблицу может составить тот, кто уже обладает достаточными знаниями или достаточным воображением, чтобы предсказать, что будет выявлено с помощью таблицы.

К сожалению, не существует, да и не может быть надежного способа проверки полноты морфологического списка.

Кроме того, возникают затруднения при выборе наиболее приемлемого решения из большого числа возможных.

Недостаток метода состоит в том, что как для выявления функций, так и для поиска приемлемых решений требуются знания базового решения и структуры проблемы, которую сам метод не раскрывает.

Наилучшие результаты метод может дать при исследовании ограниченных областей поиска, а не при изучении плохо определенных и нечетко сформулированных проблем. Исчерпывающий поиск для нахождения всех наборов частичных решений требует длительного времени. Обычно поиск прекращают после нахождения нескольких полезных комбинаций. В процессе заполнения морфологической таблицы в отношении каждой функции решают, необходимы ли альтер-

нативные варианты. Иногда некоторые функциональные элементы или нельзя, или нет смысла заменять альтернативными. Для таких функций в морфологической таблице не предусматривают отдельных строк (столбцов).

Морфологическую таблицу иногда целесообразно строить не на основе конкретного прототипа, а на основе обобщения ряда прототипов, выделяя в них характерные функциональные элементы и формулируя для них обобщенные функции, которые становятся заголовками строк (столбцов) морфологической таблицы.

В морфологическую таблицу сначала вносят элементы прототипа (первый альтернативный вариант). Затем записывают возможные наиболее интересные и эффективные варианты. При этом могут быть использованы:

- собственные знания и результаты опроса специалистов;
- справочники и энциклопедии;
- словари технических функций;
- международный классификатор изобретений и патентные описания по интересующим рубрикам;
- каталоги выставок для поиска технических решений элементов, соответствующих уровню лучших мировых образцов.

При заполнении строк (столбцов) альтернативными вариантами рекомендуется использовать метод мозговой атаки и метод эвристических приемов. В последнем случае для каждого элемента ищут улучшенные варианты функционирования.

При заполнении каждой строки (столбца) необходимо рассмотреть также возможности комбинации альтернативных вариантов. Часто объединение двух и более альтернативных вариантов позволяет устранить какой-либо недостаток одного из вариантов или усилить достоинства вариантов.

Оценим число возможных вариантов технических решений (ТР), которые можно синтезировать на основе морфологической таблицы:

$$N = n_1 - n_2 - \dots - n_m. \quad (5.1)$$

**Морфологическое мышление.** Мечтатель стремится увидеть общую картину рассматриваемой проблемы. У него доминирует установка, что *все возможно*, его мышление направлено на предмет. Он ставит перед собой задачи с вопросительными словами *что, зачем, почему*.

Например: *Что я хочу сделать или перестать делать, чего хочу избежать? Почему я хочу это сделать (с позиции убеждений)? Како-*

*ва конечная цель? Зачем это нужно? Какую выгоду я получу от достижения этой цели? Когда следует ожидать этой выгоды? Как эта идея повлияет на мое будущее?*

*Реалист* склонен к действиям, у него более развит операционный стиль мышления, он технолог.

*Как именно будет воплощена идея? Когда и где будет осуществляться каждая фаза? Кто будет это делать (уровень поведения)? Почему каждый шаг данного плана является необходимым (уровень поведения)? Когда будет достигнута общая цель? Как я узнаю о том, что цель достигнута (на уровне способности и поведения)? Как это можно проверить?*

*Критик* имеет аналитический склад ума, его усилия направлены на поиск недостатков и препятствий в осуществлении идеи. Мышление критика ориентировано на поиск способов избежать проблем путем поиска недостающих звеньев.

### **5.6.8. Метод инверсии**

При обычном прямом решении задачи осуществляется преобразование ИД до тех пор, пока не будет получен требуемый.

Прием инверсии (лат. *inversion* – переворачивание, перестановка) заключается в том, чтобы попытаться решить задачу не так, как *подсказывает* условие, а наоборот – *зайти с другой стороны*. Этот прием часто позволяет избавиться от ВПИ и найти простое решение.

Инверсное решение задачи может заключаться либо в изменении направления процесса поиска решения, либо в инверсии постановки задачи.

*Инверсия хода решения задачи* заключается в том, что рассуждения строятся не от ИД, а от результата, т. е. требуемый результат преобразовывается до получения ИД.

Например, при решении дифференциальных уравнений этот прием заключается в том, что задается вид функции «решение будем искать в виде...» или при нахождении аппроксимирующей функции для заданных табличных значений задается вид этой функции, а затем методом наименьших квадратов определяются все коэффициенты.

Иногда полезно решать задачу *с двух сторон* одновременно.

**Пример 50.** *Найти сумму всех чисел натурального ряда от 1 до 21.* Естественно стремление осуществлять сложение начиная с единицы, но решать задачу «в лоб» утомительно. Некоторые пытаются вспомнить

формулу суммы ряда арифметической прогрессии. А шестилетний Гаусс заметил общую закономерность:  $1 + 20 = 21$ ;  $2 + 19 = 21$ ; ...;  $10 + 11 = 21$ .

И таких сумм будет 10. Эту задачу можно быстро решить в уме:

$$21 \cdot 10 = 210.$$

Очевидно, что здесь используется прием одновременного применения прямого и инверсного подхода к решению задачи.

*Инверсия поставленной задачи* заключается в том, что решается не исходная задача, а другая, часто противоположная по смыслу.

Например, в математике часто используется доказательство от противного. Для этого формулируется высказывание (утверждение), противоречащее тому, что нужно доказать. Иногда доказать ложность противоречащего высказывания оказывается легче, чем истинность того, что требуется доказать.

При решении технических задач инверсия заключается в попытке перевернуть устоявшиеся формы, привычные конструкции, *сделать наоборот*, превратить вредное действие в полезное.

Можно сказать, что прием сделать наоборот воплотился при создании вертолета. Вместо того, чтобы для создания подъемной силы перемещать в воздухе самолет с неподвижно установленным на нем крылом, было предложено дать движение крылу относительно неподвижного фюзеляжа.

Если ставится задача устранения выявленных недостатков в конструкции или технологии, то одним из направлений поиска решения может быть *превратить вред в пользу*. Например, при использовании оптических волокон для средств связи столкнулись с такими нежелательными эффектами, как чувствительность волокна (изменения его свойств) к электрическому полю (эффект Керра), к магнитному полю (эффект Фарадея), к вибрациям, температуре, давлению, деформациям (например к изгибу).

Прием *превратить вред в пользу* привел к разработке волоконно-оптических первичных преобразователей (датчиков). Они позволяют измерять многие величины, например, давление, температуру, расстояние, положение в пространстве, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, колебания, массу, звуковые волны, уровень жидкости, деформацию, коэффициент преломления, электрическое поле, концентрацию газа, дозу радиационного излучения и т. д.

### 5.6.9. Метод маленьких человечков

В широком смысле модель – это любой образ, умоглядный или материальный, замещающий рассматриваемый объект при его изучении. Это может быть чертеж, конспект, график, план, выкройка, таблица, макет, шаблон и т. д. Использование моделей позволяет упростить рассматриваемый объект, выделить существенные свойства, сделать его более обозримым и наглядным для изучения.

Процесс преобразования ИД можно рассматривать как один из видов моделирования объектов, заданных в условиях задачи. При этом могут ставиться различные цели: упорядочить ИД (например в виде таблицы), глубже понять задачу и разобраться в рассматриваемых объектах, выявить связи между ними, отразить существенные свойства рассматриваемых объектов, сделать описание задачи более наглядным и легко обозримым (например, изобразить задачу в виде схемы) и т. д.

**Пример 51.** Метод маленьких человечков (ММЧ) для поиска принципа действия устройства. Умельцы придумали весьма простое устройство. В трубу, выполненную из диэлектрика, вмонтировали контакты. Для замыкания контактов в трубу бросали шарик (рис. 5.24, а). Однако сила трения уменьшает скорость шара, что приводит к значительному снижению точности временной задержки подаваемого сигнала. Представим модель ТО в виде маленьких человечков (рис. 5.24, б). Двигаясь по трубе, человечки замыкают контакты.

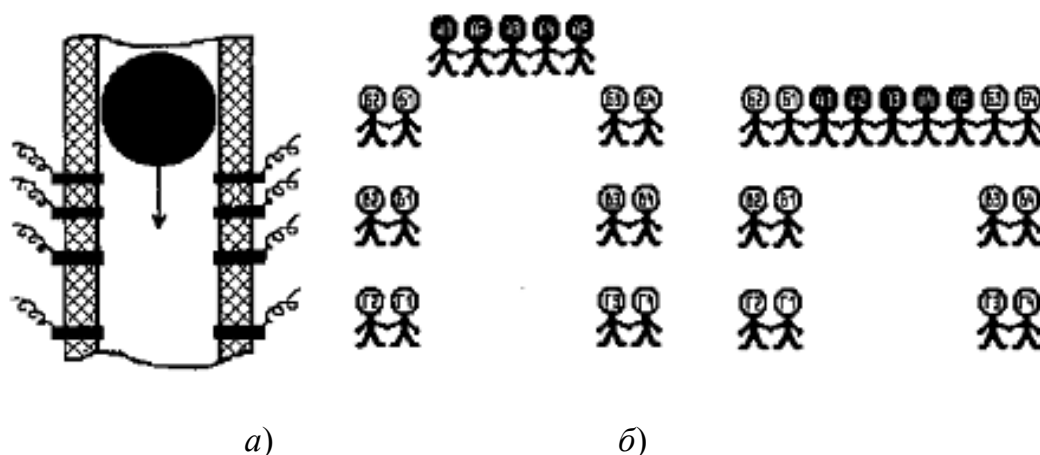


Рис. 5.24. Устройство для замыкания контактов:  
а – схема устройства; б – модель в виде маленьких человечков

Попробуем представить движение в трубе так, чтобы замыкание контактов не сопровождалось трением этого объекта о контакты (рис. 5.25).



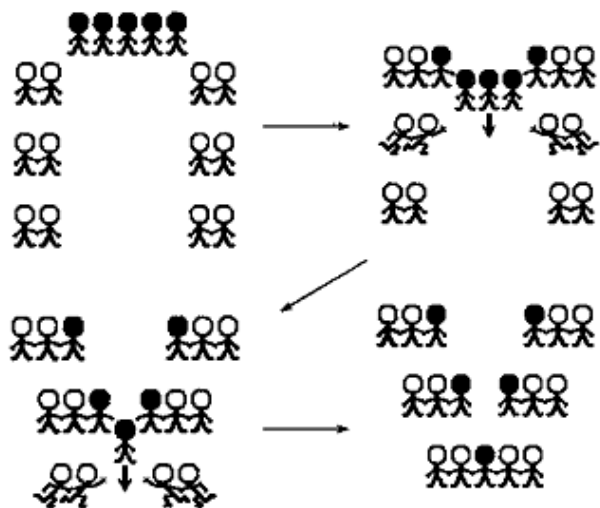


Рис. 5.25. Моделирование технического устройства маленькими человечками

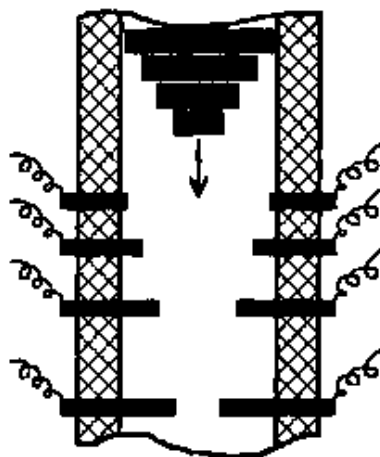


Рис. 5.26. Схема технического устройства

Эта модель «подсказывает» принцип действия устройства (рис. 5.26). Однако это только хорошая идея, которую нужно довести до работоспособного устройства.

### 5.6.10. Использование систем «элемент–поле–элемент»

Понятие «элемент» определяется как качественная сущность материи; то из чего состоит физическое тело, т. е. вещество.

Если определить *поле* или пространство, каждой точке которого можно поставить в соответствие некоторую скалярную или векторную величину, то это понятие будет хорошо согласовываться с понятием поля, принятым в физике и математике.

*Вещества.* Полезные функции ТО часто реализуются через свойства веществ. Эти свойства во многом определяются видом и состоянием вещества: твердое (монокристаллическое и дисперсное), жидкое (монокристаллическое и дисперсное), газообразное, ионизированное.

В справочной литературе можно найти более сотни физических, химических и технологических свойств веществ: плотность, твердость, электропроводность, магнитные свойства, прочность, свариваемость, ковкость и т. д.

Для твердых и жидких веществ специально выделены два состояния: монокристаллическое и дисперсное, так как от этого существенно зависят их свойства. Например, раздробленная на капли водяная струя лучше очищает загрязненную поверхность, чем сплошная монокристаллическая струя.

*Твердые дисперсные вещества (ТДВ)* – сыпучие вещества, занимающие промежуточное положение между жидкостями и твердыми телами.

Издавна для фиксации фигурных деталей сложной формы столы применяли мешочки, заполненные песком, через которые и передавалось усилие закрепления.

#### 5.6.10.1. Использование эффектов сыпучих веществ

**Пример 52.** Для обеспечения требуемых стандартов по уровню шума необходимо уменьшить уровень шума станка, не прибегая к кабинному варианту защитных элементов.

Как известно, сыпучие материалы рассеивают различные виды энергии, превращая ее в тепло за счет внутреннего трения частиц. Таким образом, можно подобрать нужный сыпучий материал.

Варианты:

1) используют сыпучий материал в покрытиях внутренних поверхностей станка (рис. 5.27);



Рис. 5.27. Схема рассеивания энергии в покрытии

2) на композиционное покрытие наносят сыпучий материал (рис. 5.28);



Рис. 5.28. Схема поглощения звуковой энергии

3) если это не дает нужного эффекта, то используем двойные стенки, между которыми поместим сыпучий материал.

**Пример 53.** В процессе работы станка возникают вибрации.

Используется сыпучий материал в конструкциях базовых деталей для повышения виброустойчивости. Для этого литейные стержни, обеспечивающие формирование облегчающих полостей, не удаляют после литья, а размельчают путем вибраций (рис. 5.29).

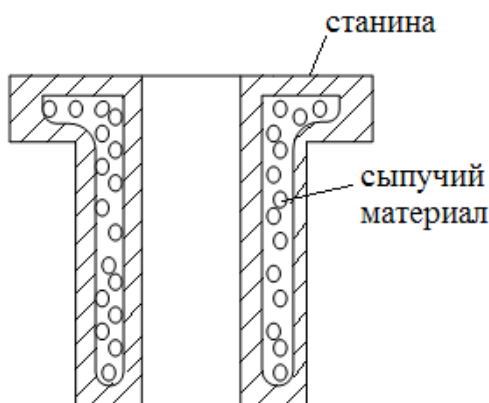


Рис. 5.29. Эскиз сечения станины с сыпучим наполнителем

За счет внутреннего трения между частицами гасятся стоячие вибрационные волны.

**Пример 54.** При расточке отверстий размеры расточного резца или борштанги, ограничиваются размерами отверстия, а длина должна превышать необходимую технологическую длину.

В процессе обработки возникают вибрации, ухудшается качество обработанной поверхности. Необходимо повысить виброустойчивость расточного резца.

Предлагается выполнить резец с пустотелой державкой, где разместить сыпучий материал (рис. 5.30).

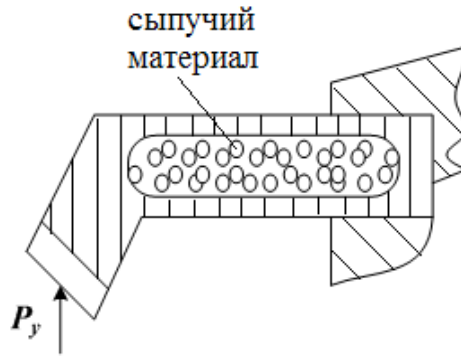


Рис. 5.30. Эскиз сечения расточного резца с сыпучим наполнителем

**Пример 55.** При ремонтно-монтажных работах для обеспечения съема деталей, соединенных натягом, используют различные выколотки из мягких материалов (цветных металлов).

Предлагается выполнить выколотку с колпачком и между ним разместить сыпучий материал (рис. 5.31).

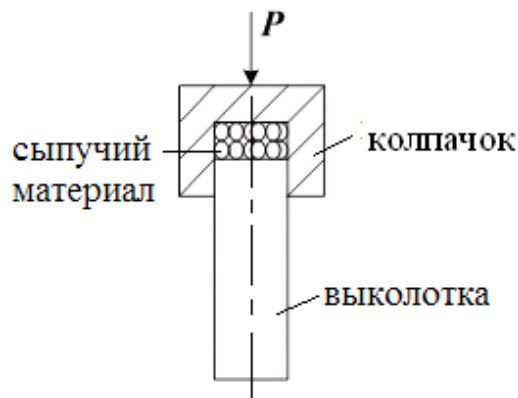


Рис. 5.31. Эскиз выколотки с сыпучим материалом

**Пример 56.** При работе молотком рабочий устаёт, так как типовая конструкция молотка обладает невысоким КПД.

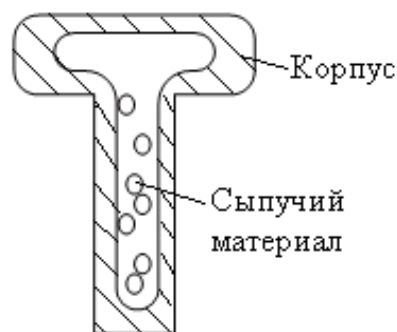


Рис. 5.32. Эскиз типовой конструкции молотка

Для повышения КПД молот выполняют пустотелым с сыпучим материалом (рис. 5.32), который, перемещаясь, при ударе изменяет центр тяжести и повышает КПД.

**Пример 57.** При обработке поверхностей деталей абразивные частицы изнашиваются и в процессе резания участвуют затупившиеся частицы (рис. 5.33).



Рис. 5.33. Эскиз зоны резания абразивной частицей

В результате на поверхности образуются прижоги. Необходимо повысить качество обработанной поверхности, не снижая производительности.

Можно было бы повысить качество, если бы зерна в процессе обработки свободно поворачивались на новые режущие кромки. В результате износа зерно само бы удалялось из зоны обработки.

Таким образом, зерно должно описывать требуемую траекторию и срезать материал, но в то же время должно быть нежестко закреплено.

**Решение:** применение магнитно-абразивной обработки (МАО) (рис. 5.34).

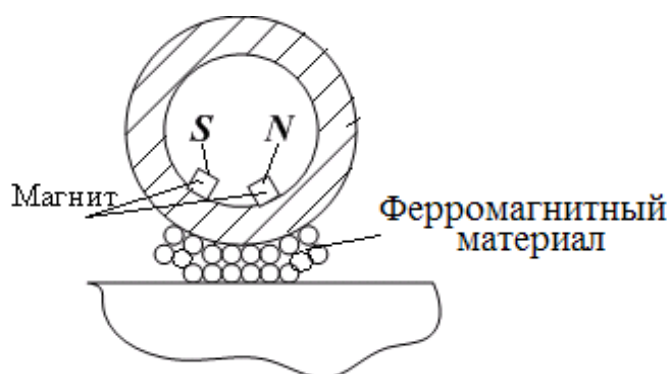


Рис. 5.34. Эскиз зоны магнитно-абразивной обработки

**Пример 58.** При обработке молотком возникает стоячая, упругая волна, которая передается в рукоятку. Необходимо уменьшить ее действие на руку работающего.

Используется сыпучий материал. В момент удара дополнительная кинематическая энергия, создаваемая сыпучим материалом, налагаясь на ударную волну, должна уменьшать стоячие волны (рис. 5.35).

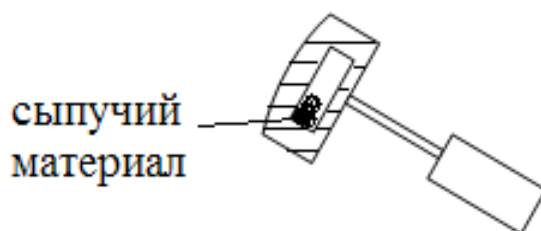


Рис. 5.35. Эскиз молотка с сыпучим материалом

**Пример 59.** Свойство сыпучих материалов: хорошо заполнять сложные формы.

Воспользовавшись этим свойством, изготавливают сложные литейные песчано-глиняные формы.

**Пример 60.** Для обеспечения литья под давлением необходимо получить сложную пресс-форму с низкой шероховатостью поверхностей. При этом сложно обработать закрытую полость формы.

**Решение:** использование направленной струи абразива. Эту струю создают воздушным потоком (пескоструйная обработка) (рис. 5.36).

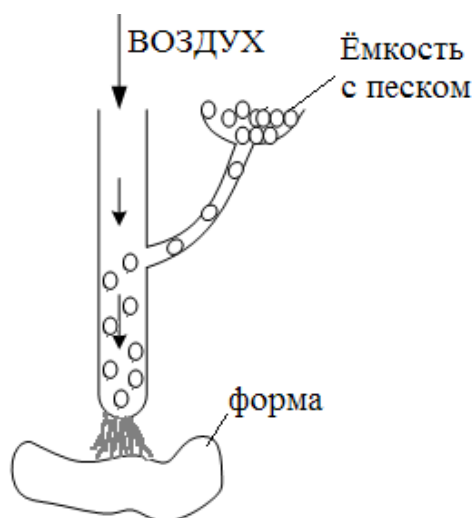


Рис. 5.36. Схема пескоструйной обработки

**Пример 61.** Необходимо обработать сложные по форме небольшие детали.

Для обеспечения производительности используется абразивный сыпучий материал и обработку производят в среде свободного абразива (рис. 5.37).

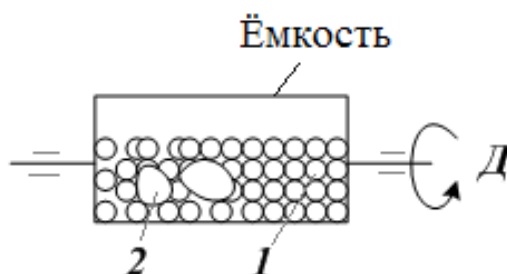


Рис. 5.37. Схема обработки в среде свободного абразива:  
1 – абразив; 2 – детали

Так как емкость не заполнена полностью, то во время вращения происходит перемешивание заготовок и материала.

Иногда используют емкости прямоугольной формы, но тогда вместо вращения налагаются вибрации, которые повышают интенсивность обработки (рис. 5.38).

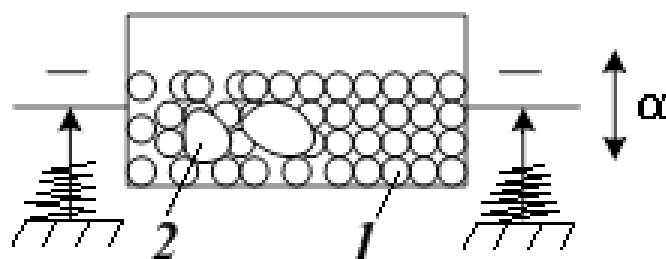


Рис. 5.38. Схема обработки с вибрациями:  
1 – абразив; 2 – детали

**Пример 62.** Необходимо произвести финишную чистовую обработку лопастей центробежного насоса.

**Решение:** используют абразивный сыпучий материал, в который помещается ротор этого насоса. При работе центробежный насос начинает перемещать абразив и тем самым происходит чистовая обработка.

**Пример 63.** Известно, что на расстоянии (3...5)  $d$  потенциальная энергия практически равна нулю в сыпучем материале.

Предлагается, используя это свойство, получить конструкцию подводимой опоры (рис. 5.39).

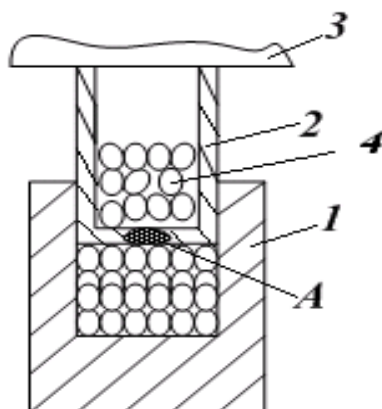


Рис. 5.39. Эскиз подводимой опоры:  
1, 2 – емкости; 3 – оборудование; А – отверстие;  
4 – сыпучий материал

Внутри емкости 2 размещают сыпучий материал. Поднимая любыми способами оборудование 3, песок из емкости 2 пересыпается в емкость 1 через отверстие А и фиксирует оборудование в требуемом положении.

Эта же идея предлагается в конструкции виброгасящей подводимой опоры.

**Пример 64.** Необходимо обеспечить сохранность абразивного материала на открытой площадке при ограниченной площади.

Используя свойство постоянства угла откоса и применяя щиты с отверстиями, обеспечивается условие задачи (рис. 5.40).

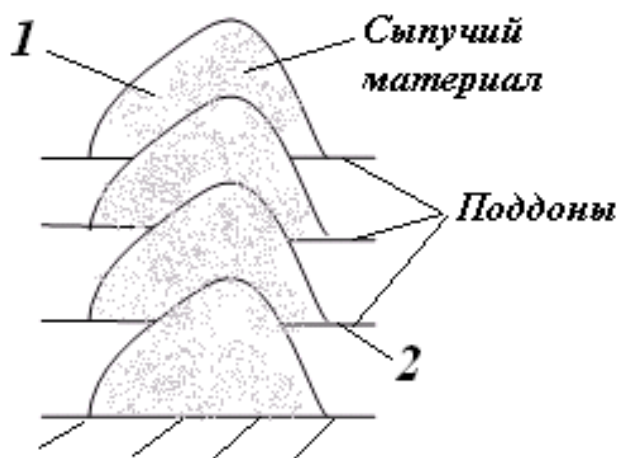


Рис. 5.40. Схема хранилища сыпучих материалов:  
1 – сыпучий материал; 2 – щит с отверстием



**Пример 65.** Необходимо обеспечить уборку масла на полу цеха. Используем свойство гидро-, пневмоскопичности при уборке масла с пола цеха с помощью сыпучих материалов (древесных опилок).

**Пример 66.** Необходимо создать конструкцию фильтра для фильтрации газов с примесями переменной дисперсности.

*Решение 1:* в емкость засыпается сыпучий материал и налагаются вибрации с ускорением, превышающим ускорение свободного падения ( $a > g$ ). В результате образуется направленный поток газа, который, проходя через сыпучий материал, фильтруется (рис. 5.41).

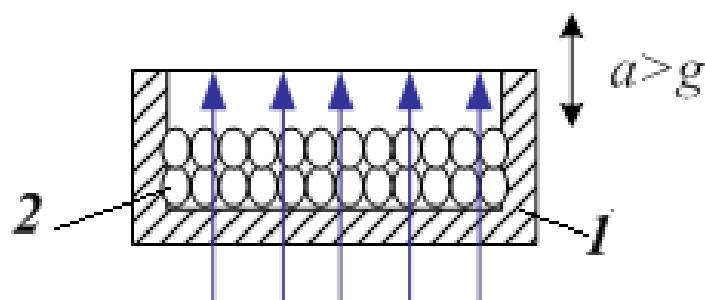


Рис. 5.41. Эскиз фильтра:  
1 – емкость; 2 – сыпучий материал

*Решение 2:* фильтр изготавливают из сыпучего материала, в состав которого входят частицы соли. После прессования соль растворяют, образуется пористый материал, который и является фильтром. Дисперсность зависит от размеров соли.

**Пример 67.** При шлифовании абразивным инструментом на поверхности обрабатываемой детали возникают прижоги. Подаваемая в зону СОЖ не обеспечивает достаточного эффекта из-за образующегося воздушного слоя.

Желательно подавать СОЖ непосредственно в зону контакта инструмента и детали.

*Решение:* предлагается при изготовлении абразивного инструмента вместе с абразивными зёрнами использовать зёрна соли, которые, растворяясь, создают поры, по которым непосредственно через абразивный инструмент подавать СОЖ в зону контакта с заготовкой.

**Пример 68.** Для обеспечения восстанавливаемости режущей кромки при обработке предлагается, по аналогии с зубом животного, заполнить зубья инструмента слоистыми: каждый слой со своей твердостью, т. е. необходимо создать материалы с заданными свойствами.

*Решение:* предлагается в расплав металла вводить дозированно легирующие элементы послойно. Для этого легирующий элемент

помещают в капсулу и в расплаве на нужной глубине они либо растворяются, либо измельчаются ультразвуком.

Таким образом, можно создать пористые металлы и материалы с заданными свойствами (магнитная резина, электропроводные композиционные материалы, магнитные жидкости).

**Пример 69.** Для обеспечения оптимального процесса резания и размещения стружки, нужна сложная форма передней поверхности зуба инструмента.

*Решение:* получить сложную переднюю поверхность можно путем спекания и прессования из сыпучего материала.

**Пример 70.** Как известно, сыпучий материал имеет переменную пористость (рис. 5.42).

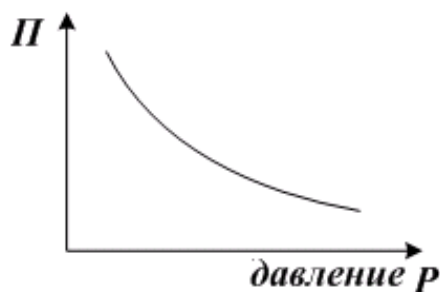


Рис. 5.42. График изменения пористости сыпучих материалов

Используя это свойство, можно создавать материалы с различными физико-механическими свойствами: от фильтров до сложных высокопрочных изделий.

**Пример 71.** Необходимо создать наиболее компактную конструкцию зуба режущего инструмента, обладающего высокой износостойкостью и обеспечивающего экономию дорогих материалов.

*Решение:* выполняется зуб составным. Это обеспечивает минимальные габариты. Используются сыпучие материалы на основе латуни, которые заполняют сложные контактные поверхности. При нагреве сыпучий материал расплавляется и обеспечивает адгезионное соединение отдельных частей.

**Пример 72.** Для обеспечения различных свойств поверхностей деталей (износостойкость, коррозионная стойкость, внешний вид) используют различные покрытия. Эти покрытия часто наносят способом припекания.

При этом используют сыпучий материал. Необходимо обеспечивать равномерную толщину покрытия.

*Решение:* отверстие воронки с сыпучим материалом (рис. 5.43, а) закрывает пластина с отверстием такого же диаметра, но со смещением (рис. 5.43, б).

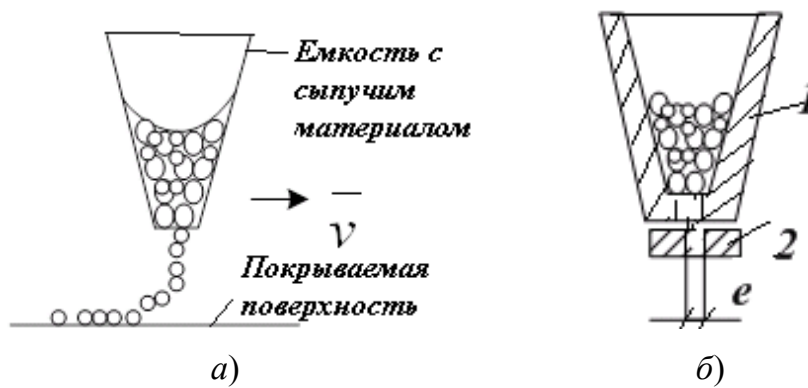


Рис. 5.43. Схемы устройства подачи сыпучего материала на поверхность:  
*a* – со свободным отверстием; *б* – частично перекрытым отверстием: 1 – воронка; 2 – пластина

Такая конструкция может использоваться в датчиках, фиксирующих хранение сыпучих материалов.

#### 5.6.10.2. Использование эффектов волокнистых материалов

1. Рассеивание энергии – за счет отражения от отдельных волокон или за счет взаимного трения волокон.

Применение сыпучих материалов при звукоизоляции механизмов создает ряд проблем, а именно: требуют защиты от пыли и загрязнения механизмов. Поэтому используют волокнистые материалы.

При этом используются звукоотражающие и звукопоглощающие свойства материалов (рис. 5.44).

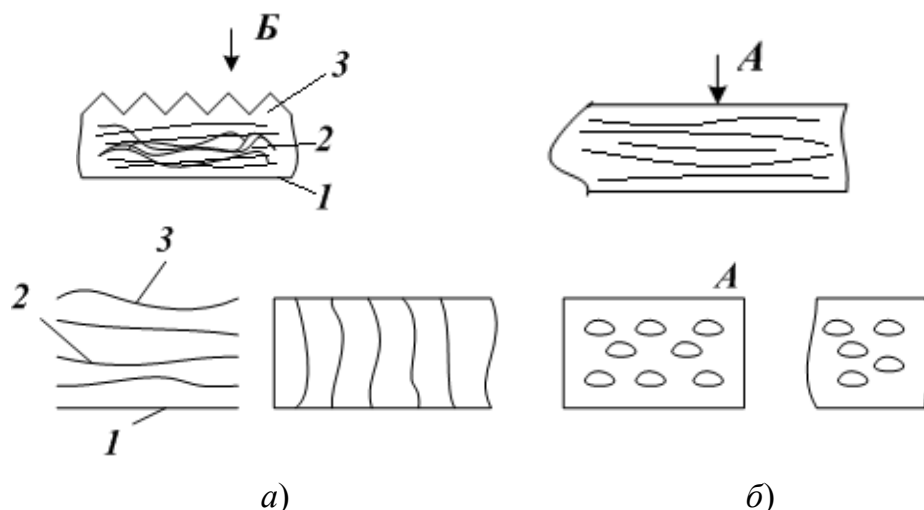


Рис. 5.44. Принципиальные схемы звукопоглощающих материалов:  
*a* – с гофрированной фольгой; *б* – перфорированной фольгой:  
 1 – базовая пластина; 2 – нетканый волокнистый материал (вата, войлок); 3 – звукоотражающая фольга

Различная интенсивность звукового потока с различной амплитудой гасится различными по свойствам неткаными материалами (рис. 5.45).

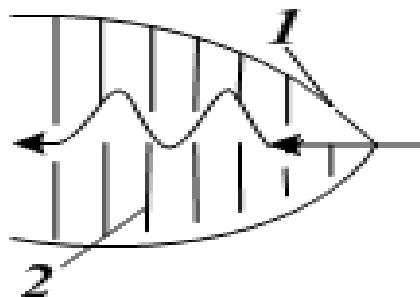


Рис. 5.45. Принципиальная схема:  
1 – корпус; 2 – волокнистый материал

Звуковая волна обладает кинетической энергией, которая в волокнистом материале преобразуется в тепловую.

Так как звуковая волна движется со скоростью  $\vec{v}$ , то, попадая в волокнистый материал, скорость ее изменяется (рис. 5.46).

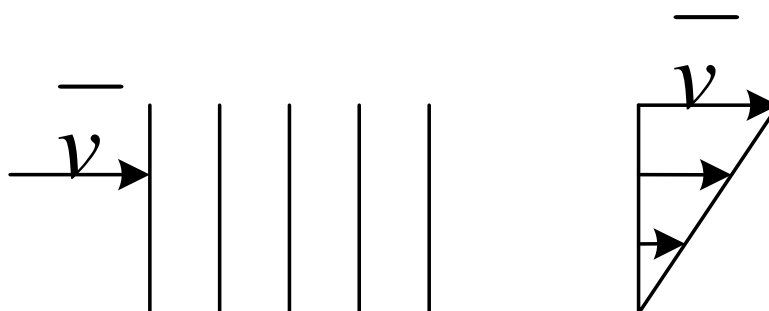


Рис. 5.46. Принципиальная схема

2. Волокнистые материалы обладают анизотропными свойствами.

**Пример 73.** В автоматизированном производстве в рабочую зону станка поступают заготовки из бункера. В бункере заготовки не ориентированы. Необходимо предложить конструкцию ориентирующего устройства.

Предлагается покрыть поверхность направляющего склиза волокнистым материалом. Заготовки за счет трения о волокна ориентируются и подаются в рабочую зону (рис. 5.47).

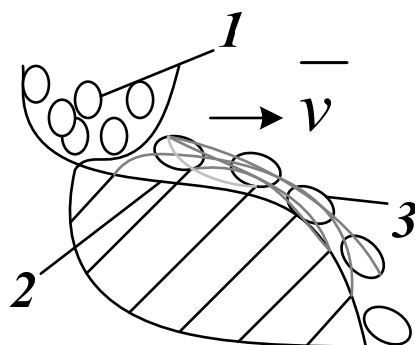


Рис. 5.47. Принципиальная схема ориентирующего устройства:  
 1 – бункер с заготовками; 2 – направляющие;  
 3 – волокнистый материал

Если уменьшить длину свободной части волокнистого материала, изменить форму сечения или его свойства, то можно добиться различных технических решений (рис. 5.48).

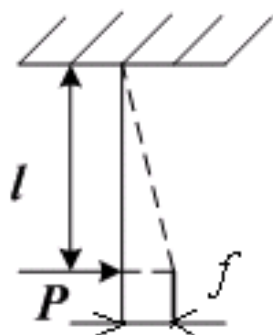


Рис. 5.48. Принципиальная схема деформации волокна материала

$$P = \frac{3EI f}{l^3},$$

где  $I$  – момент инерции сечения;  $E$  – модуль упругости материала.

Эти соотношения используются при обработке. Например, необходимо произвести обработку поверхности детали, полученной литьем или прокатом, для дальнейшего нанесения покрытия или краски.

Для обработки таких поверхностей используют волокнистые материалы в виде щеток – полимерных или металлических. Эти щетки могут быть торцевыми или периферийными.

При увеличении жесткости отдельных элементов можно достигнуть эффекта лезвийной обработки. Такие инструменты называются иглофрезами (рис. 5.49).

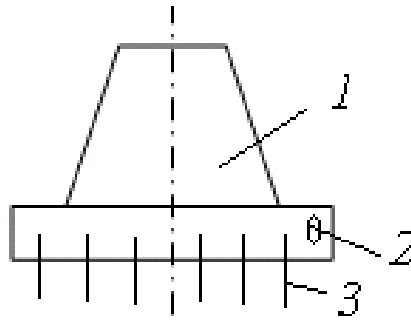


Рис. 5.49. Принципиальная схема иглофрезы:  
1 – корпус; 2 – крепежные элементы; 3 – иглы

**Пример 74.** Необходимо обеспечить транспортировку легко повреждаемых деталей. Для этого необходима точность перемещения из одной позиции в другую.

Предлагается конструкция схвата робота, покрытого волокнистым материалом (рис. 5.50).

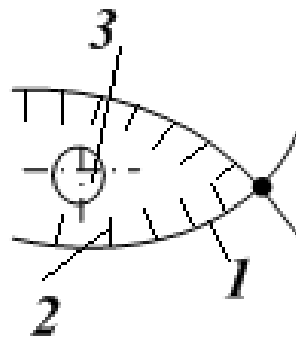


Рис. 5.50. Принципиальная схема схвата робота:  
1 – корпус; 2 – волокнистый материал; 3 – изделие

Для обеспечения больших усилий предлагаются конструкции биметаллических схватов (рис. 5.51).

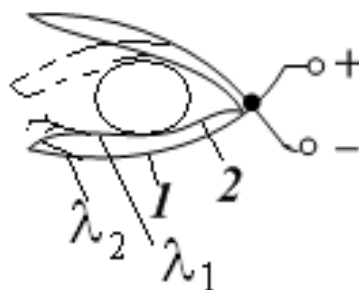


Рис. 5.51. Принципиальная схема биметаллического схвата:  
1, 2 – слои с различными коэффициентами линейного расширения

Под действием электрического тока разогреваются материалы с разными коэффициентами расширения и деформируются, что приводит к захвату заготовки.

3. Хороший контакт со сложными поверхностями. Используя свойство хорошего контакта со сложными поверхностями, можно на основе волокнистых материалов получить контактные датчики (рис. 5.52).

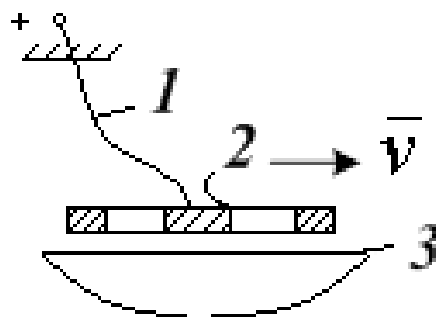


Рис. 5.52. Принципиальная схема контактного датчика

Волокнистый материал 1 обеспечивает замыкание или размыкание контакта с деталью 3, над которой перемещается лента 2 из непроводящего ток материала.

**Пример 75.** Необходимо предложить конструкцию устройства для сортировки деталей по размеру и весу.

Предлагается между накопителем и тарой установить ротор из волокнистых материалов (рис. 5.53). На различном расстоянии от оси располагаются изделия, которые под действием центробежных сил попадают в тару.

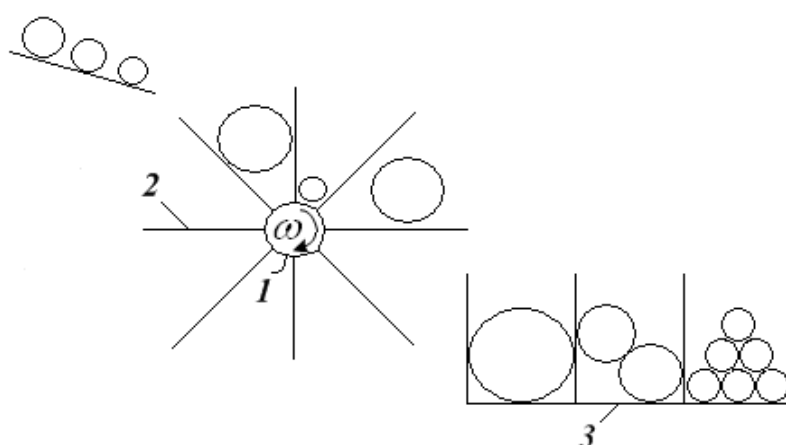


Рис. 5.53. Принципиальная схема:  
1 – ротор; 2 – волокнистый материал; 3 – тара

По аналогии предлагается конструкция увлажнителя воздуха (рис. 5.54).

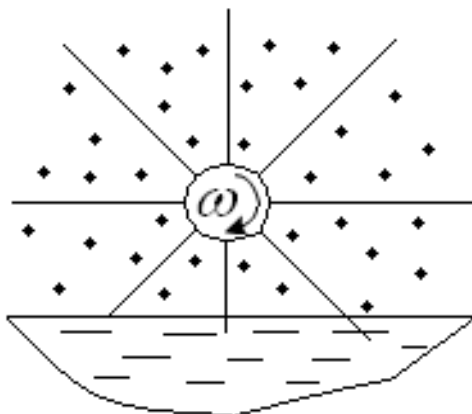


Рис. 5.54. Принципиальная схема роторного увлажнителя воздуха

Аналогичная конструкция используется для декоративного покрытия поверхностей красками.

Или, например, в привод передач и в направляющие станков необходимо обеспечить периодическую подачу смазки.

Предлагается использовать для подачи масла волокнистые материалы, один конец которых помещаем в емкость с маслом, а другой – над направляющими – получают капельную смазку.

4. Пневмо- и гигроскопичность. Используя свойство пневмо- и гигроскопичности, можно обеспечивать накапливание жидкости или газа и транспортировать на различные расстояния.

Обладая гигроскопичностью, волокнистый древесный материал может под действием жидкости разбухать, при этом нарушается концентрация солей.

При разбухании изменяются размеры. А изменение размеров можно использовать в качестве привода зажимного устройства или в качестве микродвигателя.

**Пример 76.** Необходимо разработать технологию быстрого изготовления копиров копировальных станков. Использование дерева приводит к изменению его размеров при нестабильной влажности.

Предлагается использовать волокнистые материалы, из которых формируют копир послойно, в качестве связки используют полимерные смолы.

**Пример 77.** Необходимо получить конструкцию сложной объемной формы для условий единичного, мелкосерийного производства.



Предлагается использовать волокнистые стержневые элементы, из которых формируют рабочую поверхность, а элементы между собой закрепляют механически (рис. 5.55).



Рис. 5.55. Принципиальная схема формы:  
1 – волокнистые стержневые элементы; 2 – корпус; 3 – матрица

**Пример 78.** Инженеры из Технического университета Ильменау в Германии предложили крепить электронные чипы с помощью кремниевой липучки, которая получила название «черный кремний». Для его получения кремниевую пластину облучали мощным лазером или потоком ионов так, чтобы на ее поверхности образовалась густая «шерсть» из волосков длиной 15...25 мкм. Таких волосков можно получить около миллиона на 1 мм<sup>2</sup>. Волосатая поверхность выглядит черной, поскольку фотоны в ней легко поглощаются и почти не отражаются. Это свойство «черного кремния» используют для создания эффективных солнечных накопителей энергии.

Вещества проявляют свои свойства при физическом или химическом взаимодействии друг с другом. Можно перечислить множество вариантов взаимодействий, которые проявляются при контакте только двух веществ и связаны с известными физическими явлениями: адгезия, диффузия при взаимодействии твердого монокристаллического и жидкого дисперсного, растворение при взаимодействии газообразного и твердого монокристаллического, абсорбция и т. д.

Результат взаимодействия двух и более веществ всегда сопровождается проявлением *синергетического эффекта* – появление нового системного свойства, например:

- газ, растворенный в жидкости; вода, в которой растворен кислород, становится пригодной для дыхания живых существ;
- дисперсная жидкость и газ – это пена, туман; пена приобретает свойство захватывать мелкие частицы, что используют для флотации, обогащения руды; туман связывает мелкие пылевые частицы и используется для очистки воздуха;

– жидкое монолитное и жидкое дисперсное – это эмульсия, такая как смазывающе-охлаждающая жидкость, функции которой не могут выполнить смазка и охлаждающая жидкость по отдельности;

– смесь газов: транспортный газ азот доставляет кислород в зону окисления в ряде технологических процессов;

– твердые монолитные вещества с одинаковыми и отличающимися характеристиками дают новый эффект (от явления биметаллов до эффекта Пельтье и гашения колебаний за счет трения в зоне контакта).

Древние мастера делали многослойные мечи, ножи и некоторые другие орудия. Такой меч в сечении представлял собой «трехслойный пирог». Средний слой был выполнен из высокоуглеродистой твердой (закаленной) стали, а два внешних слоя – из низкоуглеродистой мягкой стали. Внешние слои клинка изнашивались быстрее прочной и твердой сердцевины, что обеспечивало самозатачивание. При ударе мечом твердый, но хрупкий внутренний слой меньше разрушался, так как был снаружи защищен пластичной сталью.

#### *5.6.10.3. Использование полей*

Поля в соответствии с принятым ранее определением можно разделить на две группы:

*Природные* физические поля: гравитационное, электрическое, магнитное, электромагнитное.

*Искусственные* поля характеризуют распределение каких-либо параметров в пространстве, например, скоростей, давлений, температур, концентраций и т. д.

Многие искусственные поля распространяются только в веществах, например: звуковые волны, температура, давление, механические напряжения.

**Пример 79.** Известно, что усталостное разрушение металла начинается с зарождения усталостной трещины, которая образуется при возникновении в поверхностном слое значительных растягивающих напряжений. Для повышения ресурса конструкций в поверхностном слое создают внутренние сжимающие напряжения. Эти напряжения суммируются с растягивающими напряжениями, возникающими от внешних нагрузок. В результате уровень напряжений в поверхностном слое уменьшается, что приводит к повышению усталостной прочности конструкции.

**Пример 80.** Нижняя обшивка крыла самолета в полете испытывает растягивающие напряжения. Поэтому все нижние панели крыла самолета подвергаются дробеструйной обработке для создания внутренних сжимающих напряжений.

Природные и искусственные поля могут быть *скалярные*, например: поле давлений в жидкости, поле распределения температур, концентрации одного из веществ в некоторой смеси и др. и *векторные*, например, магнитное поле, поле скоростей, ускорений и др.

Многие свойства веществ проявляются при взаимодействии с физическими полями, например: теплопроводность, электропроводность, прочность, магнитные свойства и т. д. (табл. 5.13). Эти свойства можно использовать, обеспечив взаимодействие вещества с соответствующими полями.

Таблица 5.13

### Примеры полей

Взаимодействующие компоненты	Явление, процесс
Гравитационное поле – твердое монолитное – жидкое монолитное вещество	Выталкивающая сила (закон Архимеда)
Видимый свет – прозрачное твердое тело – воздушная среда	Отражение и преломление (законы геометрической оптики)
Жидкость – капилляр – электрический потенциал	Движение жидкости в капилляре (электрокапиллярный эффект)
Перемещение электрического проводника в магнитном поле	Электродвижущая сила
...	...

В отличие от полей, которые имеют некоторое распределение в пространстве, вещества могут иметь свойства, которые характеризуют особенности материала в целом, например: температура плавления, точка Кюри, предел прочности материала, модуль упругости, скорость распространения звуковых волн и т. д. Свойства веществ проявляются при взаимодействии с полями.

#### 5.6.10.4. Взаимодействие веществ и полей

Например, если плотность твердого вещества больше плотности воды, то оно утонет, но если этому веществу придать форму с полостью, то оно будет плавать. Кроме того, веществу можно задать такую форму, которая придаст телу остойчивость и устойчивость при движении в жидкости.

Геометрическое поле – это некоторая абстракция, под которой подразумеваются форма веществ и полей, а также их положение в пространстве и взаимное расположение. Изменение геометрического поля – одно из средств влияния на свойства веществ и ресурс для получения системного эффекта.

Взаимодействие вещества с физическим полем также способствует появлению нового системного свойства.

**Пример 81.** В детской игрушке волчок поле скоростей (вращение) придает ей устойчивость. Двух- и трехстепенные гироскопы обладают такими свойствами, которые позволяют использовать их для измерения углового положения тел (трехстепенные) и угловых скоростей.

Системный эффект, который проявляется при взаимодействии полей с веществами, во многом зависит от того, как изменяется фазовая переменная полей ( $\Phi_n$ ) во времени (рис. 5.56), например: электрическое напряжение, давление, скорость и т. д.

Если давление имеет гармоничный или импульсный характер от некоторого источника, то проявляются совсем другие свойства: распространяются продольные или поперечные волны, действуют законы отражения и преломления на границе сред.



Рис. 5.56. Временные характеристики полей

**Пример 82.** В призматической детали по центру выполнено отверстие. Когда в отверстие поместили заряд взрывчатого вещества и произвели его подрыв, образец развалился на четыре части, причем разрушение произошло по диагонали параллелепипеда. Это объясняется тем, что ударная волна сжатия, дойдя до границы образца, отразилась. Но при отражении фаза волны меняется на  $180^\circ$ . Очевидно, что отразилась волна разрежения. Две отраженные волны разрежения встретились по диагонали параллелепипеда. Именно поэтому здесь и произошло разрушение.

### 5.6.11. Анализ ЭПЭ систем

Процессы токарной обработки, шлифования, обработки давлением можно охарактеризовать такими полевыми характеристиками, как: форма поверхности контакта между инструментом и заготовкой; напряжения, возникающие в теле заготовки и инструменте; тепловое поле в зоне инструмента и заготовки.

Присутствие абстрактного поля в модели может ориентировать на применение приема *произвести количественные изменения в ЭПЭ системах*, например: изменить характер распределения температуры, внутренних напряжений, форму тела, характер его движения и т. д.

В зависимости от поставленной цели технические задачи в самом общем виде можно разделить на два типа:

1) задачи на обнаружение или измерение параметров элементов или полей;

2) задачи на изменение элементов (изделий), т. е. осуществление целенаправленного физико-химического воздействия на некоторый объект для измерения его свойств. Разница в этих двух задачах заключается в объекте.

В задачах на измерение (обнаружение) объектом может быть поле или элемент, а в задачах на изменение – только элемент, хотя первоначально задача может быть сформулирована в следующем виде: изменить поле, например, напряжение, частотную характеристику и т. д. Однако для этого нужно изменить ТС, т. е. необходимо воздействовать на элемент или физическое поле, чтобы изменить их полевые характеристики.

Взаимодействие полей может осуществляться не только через элементы. Например, сила Кориолиса является результатом взаимодействия двух полей: вращательного и поступательного движения. Эффект Доплера проявляется при наличии относительного движения двух элементов (тел) – источника и приемника излучения, и переменного звукового или электромагнитного полей. Элемент может являться как носителем, так и регистратором взаимодействия полей.

Связи в ЭПЭ системах отражают взаимодействие между элементами и полями. Это взаимодействие может быть *адекватным* – соответствовать требованиям, а может быть *неадекватным*, например: недостаточным, избыточным, оказывать вредное воздействие на элемент или поле, полезное действие может сопровождаться нежелательными явлениями. В ЭПЭ системах адекватное взаимодействие будем обозначать сплошной линией, а неадекватное – пунктирной.

В терминах такого подхода можно выделить три типовые задачи, отражающие взаимодействие между элементами и полями и между полями.

В соответствии с приемами системного подхода общий принцип поиска решения состоит во введении (или удалении) в схему исходной ЭПЭ системы полей или количественные изменения полевых ха-

рактических элементов, полей и их взаимодействия. Цель этих действий – получить нужное взаимодействие или избавиться от вредного за счет получения системного эффекта.

Например, при пайке для растворения оксидов и улучшения смачивания деталей ( $B_1$ ) расплавленным припоем ( $B_2$ ) вводят флюс ( $B_3$ ).

### ***Способы использования ЭПЭ систем***

1. Если имеется элемент и на него действует поле, то необходимо для поиска нового решения разделить элемент на два. Действие поля направить на дополнительный элемент.

**Пример 83.** Необходимо найти способ сварки стеклянных ампул, в которых находится жидкость, которая испаряется при определенных температурах.

**Решение:** погружают ампулу в охлажденную среду (циркулирующую жидкость), а вершину нагревают и сваривают.

2. Использование дополнительных полей, направленных на один из элементов.

**Пример 84.** В процессе резания для повышения производительности и уменьшения износа инструмента используют дополнительный подогрев заготовки. Другие примеры по улучшению взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием приведены в табл. 5.14.

3. Переход на следующий уровень, т. е. от макро- на мили-, от мили- на микро- и от микро- на наноуровень.

**Пример 85.** Очистке деталей от загрязнений существенно препятствуют силы сцепления между их поверхностью и частицами грязи. Чтобы разорвать эту связь, вводится вещество-посредник. Например, поверхностно-активные вещества (ПАВ), действие которых основано на ослаблении межмолекулярных связей между загрязнениями и поверхностью очищаемой детали. Сами ПАВ практически не расходуются и остаются в растворе.

Для финишных процессов в микроэлектронике используется вода высочайшей степени очистки. После многократной дисципляции в ней все же остаются микродозы солей, которые удаляют, пропуская воду через ионообменник. При этом ионообменные смолы не расходуются, а перераспределяют ионы загрязненной воды нужным образом.

В технологиях микроэлектроники используют газы высокой степени чистоты. Однако в процессе хранения они быстро вбирают влагу. Чтобы осушить технологические газы, применяют абсорбенты, которые поглощают пары воды. После нагревания они выделяют воду и их можно использовать повторно.

**Примеры решения задач по улучшению взаимодействия  
инструмента с обрабатываемым изделием**

Пример решения задачи	ЭПЭ схема	Пример
Введение вещества-посредника ( $V_1$ ), хорошо взаимодействующего с инструментом и изделием	$V_o - V_1 - V_n$	Обработка резанием ( $V_1$ – введение смазочно-охлаждающей жидкости – нет перегрева инструмента и детали)
Введение поля ( $\Pi$ ), которое хорошо взаимодействует с инструментом		Химическое травление металлов ( $V_n$ – химический реактив, $\Pi_{\text{мех}}$ – перемешивание раствора. Улучшается полевая характеристика процесса ( $\Pi_a$ ) – равномерное воздействие раствора по поверхности детали)
Введение теплового поля ( $\Pi_{\text{тепл}}$ ), которое хорошо взаимодействует с изделием		Обработка резанием ( $V_n$ – формирующий инструмент создает механическое воздействие ( $\Pi_{\text{мех}}$ ) на заготовку; $\Pi_{\text{тепл}}$ – нагрев заготовки (тепловое поле))
Введение ультразвукового поля ( $\Pi_{\text{узк}}$ ), которое хорошо взаимодействует с изделием		Промывка деталей (введение ультразвукового поля $\Pi_{\text{узк}}$ , $V_{\text{инстр}}$ – моющий раствор)
Введение вещества-посредника ( $V_1$ ) и поля ( $\Pi$ ), которое хорошо взаимодействует как с посредником, так и с инструментом		Гальванопластика – получение копий путем нанесения металла и отделения его от исходной формы ( $V_1$ – разделительный слой (графит), $V_m$ – гальванически осажденный металл, $\Pi_e$ – электрическое поле)
Введение дополнительного вещества ( $V_{\text{доп}}$ ), которое улучшает взаимодействие инструмента с изделием		При обработке труб от момента внешних ( $\Pi_n$ ) сил деформируется сечение. В трубу вводят наполнитель ( $V_{\text{доп}}$ ), который создает давление внутри трубы ( $\Pi_{\text{давл}}$ )

**Пример 86.** Зимой 1919 г., спасаясь от холода, студенты Московского авиатехникума соорудили прямо в аудитории, где слушали лекции Н. Е. Жуковского, печку. Но в суровые морозы печка не могла про-

греть все помещение. Поэтому на нее поставили бак с водой – своего рода тепловой аккумулятор. Он работал, но только нещадно парил, мешал заниматься. Сырость оказалась хуже холода. Тогда Жуковский посоветовал налить поверх воды машинного масла. Простейшая хитрость удалась, вода не испарялась и долго сохранялось тепло.

### 5.6.12. Физико-технические эффекты

Как правило, не всегда можно выделить отдельно математические, геометрические и физические эффекты, которые лежат в основе ФПД [14].

**Пример 87. Форма сечения крыла самолета.** Поперечное сечение крыла самолета несимметрично: нижняя часть плоская, а верхняя – выпуклая (рис. 5.57).



Рис. 5.57. Схема обтекания крыла самолета

Длина траектории потока воздуха по верхней стороне больше, чем по нижней. Поэтому скорость потока на верхней стороне больше, чем на нижней, а в соответствии с законом Бернулли чем выше скорость, тем меньше давление в потоке. Таким образом, только за счет разницы нижней части крыла и создается подъемная сила.

**Пример 88. Эффект Доплера.** Из физики известен эффект Доплера, который заключается в изменении частоты колебаний (длины волны), воспринимаемой наблюдателем, если источник колебаний движется относительно наблюдателя или наблюдатель движется относительно источника (рис. 5.58).

**Пример 89. Лазерное излучение.** Лазер – генератор когерентного света. Идеально упорядоченная (когерентная) волна имеет строго определенные длину и частоту, плоский фронт и является идеально поляризованной. Лазерный луч может иметь в диаметре доли миллиметра и очень высокую плотность энергии. Эти свойства нашли широкое применение в микроэлектронике, послужили основой для многих лазерных технологий: сверление, резка материалов, сварка и пайка, поверхностная обработка для упрочнения, селективное осаждение слоев металла, маркировка и гравировка.



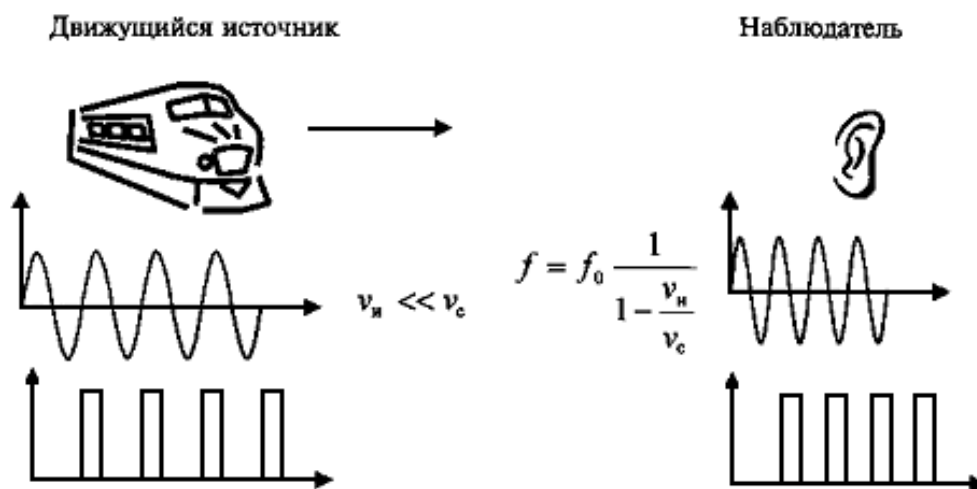


Рис. 5.58. Иллюстрация эффекта Доплера:  
 $v_n$  – скорость движения источника;  
 $v_c$  – скорость распространения волны в среде

**Пример 90. Поляризованный свет.** Когда поляризованный свет проходит через кварцевую пластинку, плоскость поляризации поворачивается на некоторый угол, величина которого зависит от толщины пластинки. Известно, что толщина пластинки зависит от температуры. Сочетание этих двух эффектов дает новый ФПД – способ измерения температуры.

**Пример 91. Сверхпроводимость.** Этот эффект использован в ряде устройств: мощные сверхпроводящие магниты, магнитные опоры и подвески, сверхпроводящие сверхвысокочастотные передатчики и приемники, ускорители заряженных частиц и др. Еще больше предложено перспективных проектов типа магнитопланов и магнитоходов, ЭВМ на сверхпроводниках. Сверхпроводники совершенствуются, их критическая температура повышается практически до комнатной.

### 5.6.13. Математические эффекты

**Пример 92.** Некоторое устройство получает сигналы  $S_1$  и  $S_2$ , которые сначала усиливаются – каждый своим усилием, а затем сравниваются. Если результат положительный, то вырабатывается один управляющий сигнал, а если отрицательный, то – другой.

Математический эффект, известный из курса средней школы, дает ключ к решению этой задачи. Разность квадратов двух величин всегда существенно больше, чем разность самих этих величин:

$$(S_1^2 - S_2^2) \gg (S_1 - S_2).$$

Изменение схемы работы устройства позволяет сделать так, что, во-первых, погрешности коэффициентов усиления не влияют на получаемый результат и, во-вторых, снижаются требования к качеству входного сигнала.

**Пример 93.** При проведении измерений часто возникает задача уменьшить случайную составляющую погрешности измерения.

Из теории вероятности стало известно, что если на исследуемую величину влияет много случайных факторов и действие их примерно одинаково, то эта случайная величина подчиняется нормальному закону распределения. Если проводить несколько измерений и определять среднее значение, то в получаемом результате доля случайной составляющей погрешности будет меньше, чем при однократном измерении.

Из математики известно также, что если число измерений больше 10, то максимальное практически возможное отклонение истинной величины от среднего арифметического значения будет меньше, чем среднее квадратичное отклонение ( $\sigma$ ). Отклонение не превысит величины  $3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  ( $n$  – число измерений). Таким образом можно рассчитать минимально необходимое число операций измерения для получения заданной точности.

#### *5.6.13.1. Использование эффектов односторонних поверхностей*

**Пример 94.** Если концы длинной ленты соединить, то образуется кольцо. Но если при этом плоскости соединяемых концов развернуть на  $180^\circ$ , то получится так называемая лента Мебиуса, названная в честь профессора университета Августа Фердинанда Мебиуса (1790–1868), который впервые упомянул о ней в 1858 г. Эта замкнутая лента, которую часто называют односторонней поверхностью, обладает многими удивительными свойствами.

В конце XIX в. патентные службы начали регистрировать изобретения, в основе которых была односторонняя поверхность.

Одно из первых отечественных изобретений, в котором было предложено использовать ленту Мебиуса (а. с. № 70549) – ленточная пила, в которой режущие зубья на гибком полотне пилы выполняются с двух сторон (рис. 5.59).

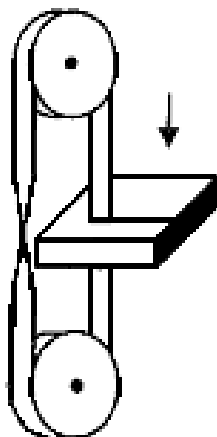


Рис. 5.59. Двухсторонняя ленточная пила

Ленту Мебиуса можно использовать в устройствах для перемешивания смесей. В такой установке вектор силового воздействия в каждой точке соприкосновения рабочего органа с перемешиваемыми продуктами меняет свое направление на  $360^\circ$  за каждый оборот вала.

**Пример 95.** Необходимо повысить долговечность ременной передачи.

Предлагается использовать ремни в виде односторонних поверхностей (рис. 5.60).

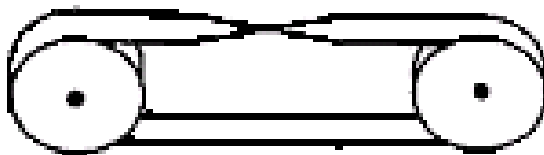


Рис. 5.60. Схема ременной передачи

**Пример 96.** Необходимо повысить производительность при обработке круглых заготовок на ленточно-шлифовальных станках. Решили изготовить абразивную ленту в виде односторонней поверхности (рис. 5.61).

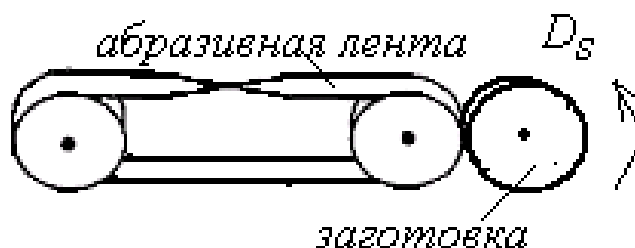


Рис. 5.61. Принципиальная схема ленточного шлифования

**Пример 97.** Необходимо повысить надежность ленточного транспортера. Предлагается изготовить ленточный транспортер с лентой в виде односторонней поверхности, кроме того можно обеспечить не только транспортировку деталей, но и опрокидывание.

А при транспортировке листовых материалов – его кантование (перекидывание на другую сторону).

**Пример 98.** Необходимо повысить емкость магнитного накопителя.

Предлагается использовать накопитель в виде односторонней поверхности. Причем в сечении он может быть в виде треугольника, квадрата, многоугольника (рис. 5.62).

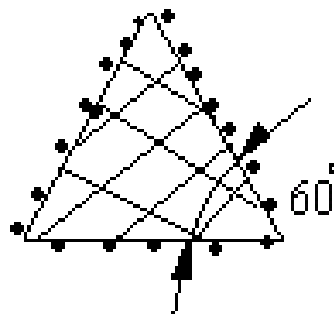


Рис. 5.62. Сечение магнитного ленточного накопителя

Таких же форм может быть выполнен и абразивный инструмент.

#### 5.6.13.2. Использование эффектов спирали

Спираль образуется при равномерном движении точки вокруг оси и перемещении ее по радиусу (рис. 5.63).

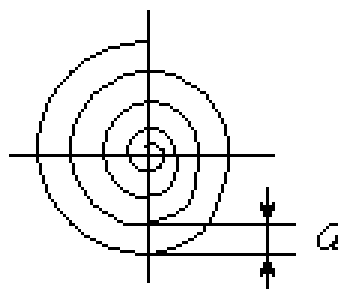


Рис. 5.63. Эскиз спирали

Если  $a = \text{const}$ , то спираль Архимедова.

Исходя из определения, в форме спирали могут быть выполнены устройства, преобразующие движения: кулачки в станках с управлением от распределительного вала, зажимы, домкраты и т. д. (рис. 5.64).

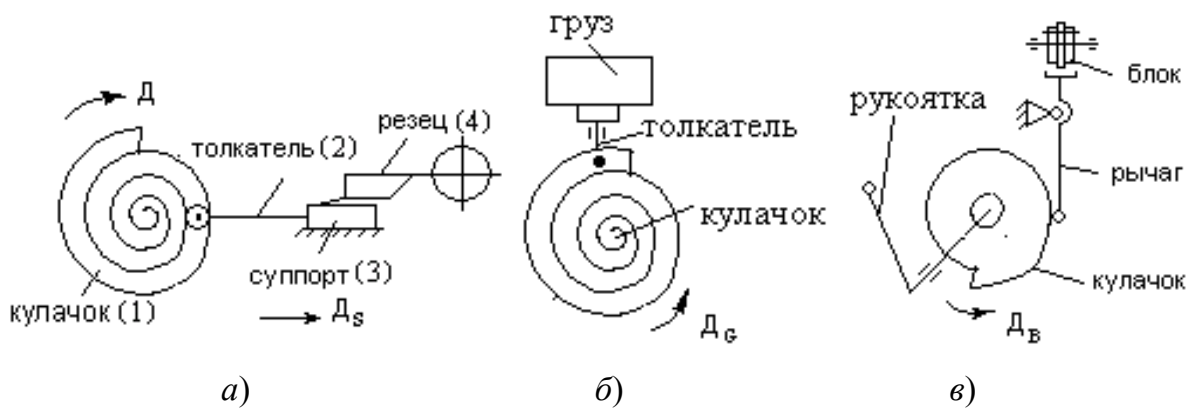


Рис. 5.64. Принципиальные схемы механизмов на основе спиралей:  
*a* – привода станка; *б* – домкрата; *в* – механизма переключения скоростей

**Пример 99.** Необходимо обеспечить раскрой листового материала при постоянном усилии.

Предлагается использовать нож с рабочей поверхностью в виде спирали (рис. 5.65).

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\dot{\rho}}{\rho},$$

где  $\rho$  – радиус кривизны спирали.

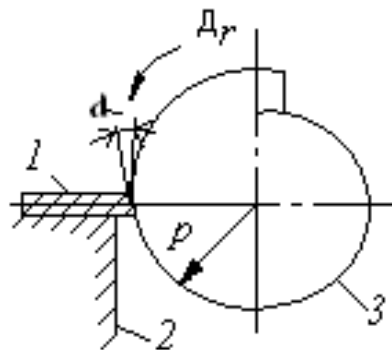


Рис. 5.65. Принципиальная схема:  
*1* – листовый материал; *2* – опора; *3* – нож

**Пример 100.** Необходимо разработать конструкцию режущего инструмента, срезание припуска при обработке которым происходит за один оборот инструмента.

Предлагается использовать многозубый инструмент, зубья которого могут быть расположены на периферии или торце, а вершины расположены по спирали (рис. 5.66).

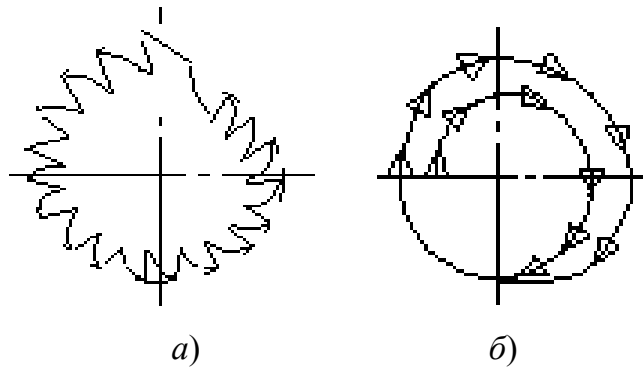


Рис. 5.66. Принципиальная схема расположения зубьев в инструментах:  
*a* – на периферии; *б* – на торце

Получили дисковые протяжки (периферийные или торцевые).

**Пример 101.** Как известно, синтетические сверхтвердые материалы позволяют изготовить лезвийный инструмент высокой стойкости. Режущие элементы этого инструмента выполняются в виде зерен, т. е. небольших размеров.

Необходимо, используя свойства синтетических материалов, спроектировать лезвийный инструмент, обеспечивая черновую, получистовую и чистовую обработку плоскостей.

Предлагается расположить зубья в инструменте по спирали со смещением в осевом направлении, равном глубине резания каждого зуба.

**Пример 102.** Необходимо предложить форму задней поверхности направляющей фасонного зуба инструмента, при переточке которого по передней поверхности размеры профиля не изменяются.

Предлагается выполнить заднюю поверхность по спирали (рис. 5.67).

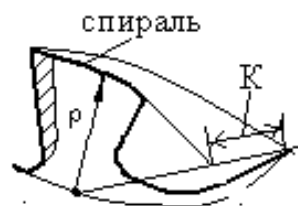


Рис. 5.67. Эскиз зуба инструмента

**Пример 103.** При закреплении осесимметричных деталей необходимо для обеспечения точности и соосности реализовать условную базовую поверхность в виде оси.

Предлагается использовать нечетное количество зажимов, которые синхронно перемещаются к центру при помощи диска, паз которого выполнен по спирали Архимеда (трехкулачковый патрон).

Расстояние между двумя последовательными витками спирали Архимеда является величиной постоянной и равной  $2a\pi$  (рис. 5.68).

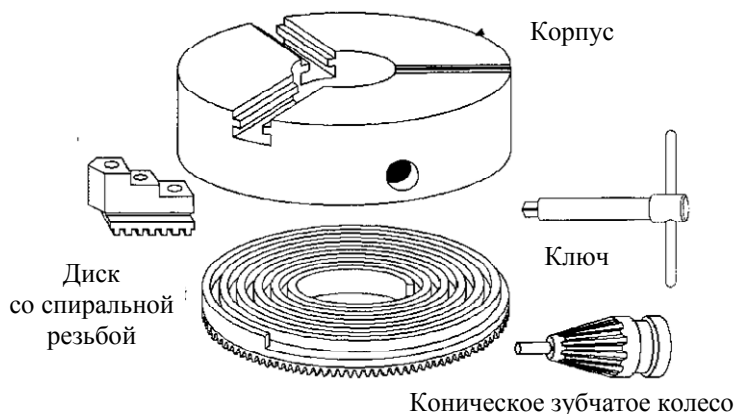


Рис. 5.68. Основные элементы трехкулачкового патрона

Наматывая тонкую ленту на вал, можно плавно изменять линейные размеры, например, линейный размер  $A$ , показанный на рис. 5.69, а также создавать значительные усилия.

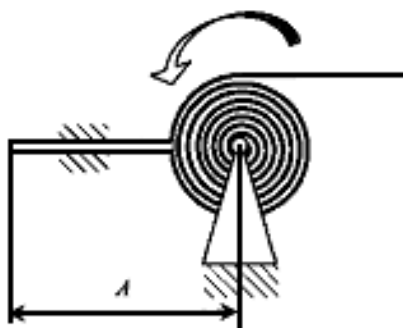


Рис. 5.69. Применение спирали Архимеда для регулирования линейных размеров

По принципу работы детской игрушки уди-уди (рис. 5.70) устроены приборы для измерения давления – манометры. Если в полую криволинейную трубку, выполненную из упругого эластичного материала, подать давление, она распрямится, при сбросе давления – снова свернется. Такое устройство может быть использовано для создания усилий перемещений внутри герметичных объемов. По этому принципу может работать захват для удержания хрупких предметов, а также накопитель материалов.

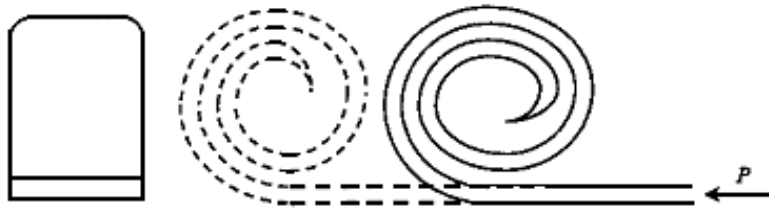


Рис. 5.70. Изменение формы и размеров полой спиральной трубки при изменении давления

**Пример 104.** При автоматизации операции, на которой обрабатываются заготовки плохо ориентированные в пространстве, необходимо спроектировать накопитель с устройством их поштучной выдачи в зону обработки.

Предлагается использовать в качестве накопителя ленту, в которую закрепляют заготовки, сориентированные в пространстве (рис. 5.71).



Рис. 5.71. Принципиальная схема накопителя

**Пример 105.** При изготовлении рулонных изделий из легкоповреждаемых материалов необходимо разработать привод упаковочной машины.

Используя типовой привод, можно обеспечить постоянную угловую скорость, которая при размотке большого барабана накопителя приведет к разрыву материала.

Предлагается использовать рулонный привод, так как линейная скорость изменяется за счет изменения радиуса ведущего шкива, то разрыва не происходит (рис. 5.72).

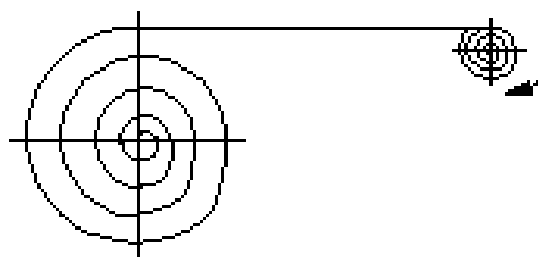


Рис. 5.72. Механизм разгона привода



**Пример 106.** Необходимо разработать конструкцию очищающегося фильтра с различной дискретностью фильтрации.

Предлагается изготовить его методом намотки (рис. 5.73).

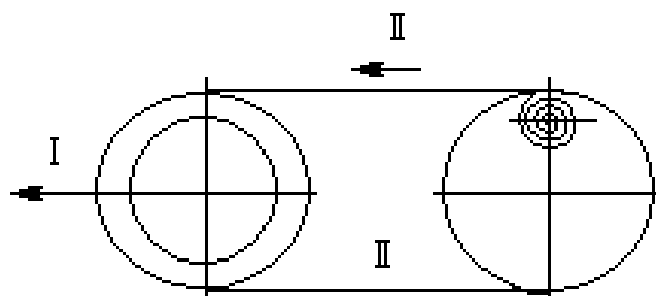


Рис. 5.73. Принципиальная схема фильтра:  
I – зона фильтрации; II – зона очистки фильтра

Методом намотки выполняется привод станка или домкрата (рис. 5.74).



Рис. 5.74. Принципиальная схема домкрата

Также методом намотки получают спиральные пружины или обеспечивают армирование абразивного инструмента.

### 5.6.13.3. Использование эффектов гиперболических поверхностей

**Пример 107.** Гиперболоид – поверхность, образуемая при вращении гиперболы. В зависимости от того, происходит ли вращение вокруг линии, соединяющей фокусы, или вокруг перпендикулярной к ней прямой, проходящей через ее середину, получается двухполостный (рис. 5.75, а) или однополостный (рис. 5.75, б) гиперболоид вращения.

Так же, как и цилиндрические и конические поверхности, однополый гиперболоид может быть получен скольжением прямой линии (рис. 5.76). Поэтому перечисленные поверхности получили общее название линейчатых.

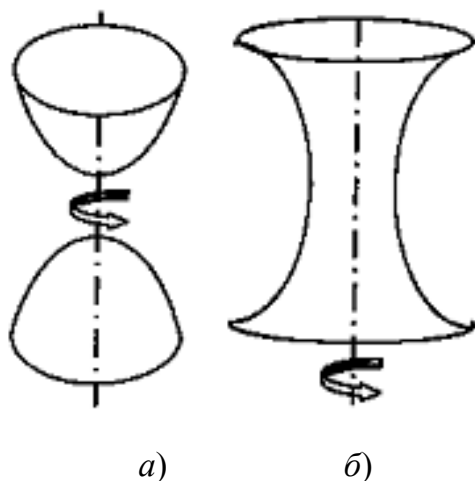


Рис. 5.75. Гиперboloиды вращения  
*a* – двухполостный; *б* – однополостный

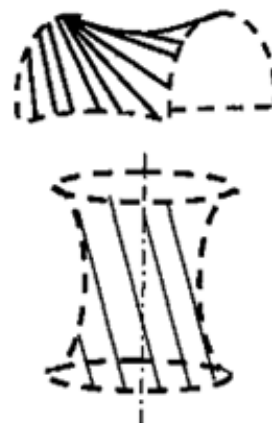


Рис. 5.76. Гиперboloиды –  
 линейчатые поверхности

**Пример 108.** При вращении верхнего кольца относительно нижнего вокруг оси  $O-O'$  (рис. 5.77) происходит изменение формы боковой поверхности.

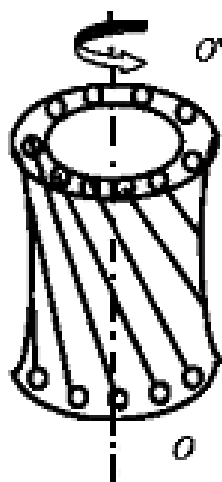


Рис. 5.77. Изменение формы боковой поверхности  
 гиперboloида вращением колец

**Пример 109.** Необходимо обеспечить точное бесцентровое шлифование деталей при их непрерывном перемещении в зоне обработки.

Предлагается изготовить абразивный инструмент в виде однополостного гиперboloида, и в зоне обработки поворачивают его так, чтобы направляющая поверхности детали совпала с образующей гиперboloида.

Расположенный под углом абразивный инструмент создает дополнительную осевую силу, перемещающую деталь вдоль оси.

Для получения рабочей поверхности абразивного инструмента в виде гиперboloида и во время его правки алмазный инструмент перемещают по линии, образующей гиперboloид.

**Пример 110.** Необходимо обеспечить получение радиусной фасонной поверхности лезвийной обработкой при высокой производительности [3].

Предлагается использовать резец с линейной режущей кромкой, заточенной под углом  $\lambda$ . Во время обработки он перемещается по радиусу к центру заготовки (рис. 5.78).

Второй вариант. Прямую режущую пластину закрепляют между двумя дисками, поворачивая их друг относительно друга, обеспечивают требуемый радиус кривизны инструментальной поверхности. В итоге получают фасонную фрезу.

По аналогии зуб может быть с абразивосодержащим слоем.

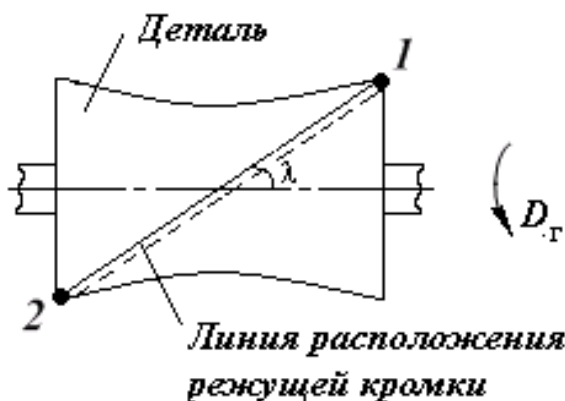


Рис. 5.78. Принципиальная схема обработки

**Пример 111.** Необходимо предложить конструкцию датчика, который фиксирует крутящий момент во время обработки.

Предлагается в качестве силового элемента датчика использовать два диска, связанные между собой линейными пластинами, на которых наклеены преобразователи различного типа (тензометрические, емкостные, индуктивные и т. д.).

Один диск этого преобразователя закрепляют неподвижно, а к оси второго прикрепляют измеряемый элемент (узел). Прикладывая крутящий момент, диски поворачивают друг относительно друга, а преобразователи электричества линейно деформируются, что снижает погрешность измерения.

**Пример 112.** Необходимо предложить конструкцию захвата робота для перемещения легкоповреждаемых поверхностей деталей.

Предлагается захват выполнить в виде гиперболоида, у которого линейные элементы схвата соединены с дисками шарнирно. При повороте дисков друг относительно друга происходит зажим изделия, а при обратном движении – разжим.

#### 5.6.13.4. Использование свойств винтовых линий

Винтовая линия образуется при движении точки вокруг оси и перемещении вдоль ее.

Винтовая линия может быть на цилиндре или на конусе.

Винтовую линию на конической поверхности можно выполнить с постоянным шагом, тогда она будет с переменным углом подъема, или наоборот (постоянный угол и переменный шаг). Понятно, что если винтовая выполнена с постоянным углом и переменным шагом, то поверхность будет обеспечивать перемещение различных веществ с их уплотнением.

**Пример 113.** Необходимо повысить производительность при нарезании конических зубчатых колес.

В пределах линии общей нормали шаг зубьев конического колеса будет переменным, поэтому используются конические червячные фрезы, у которых переменный шаг, а угол подъема постоянный. А для чистовой обработки используют конические абразивные инструменты.

Способ формирования винтовой позволяет использовать ее в качестве преобразователя движений (вращательное в поступательное или наоборот) – это передача «винт–гайка». Но так же могут выполняться рабочие поверхности цилиндрических копиров, кулачков, элементы механизмов переключения скоростей (рис. 5.79).

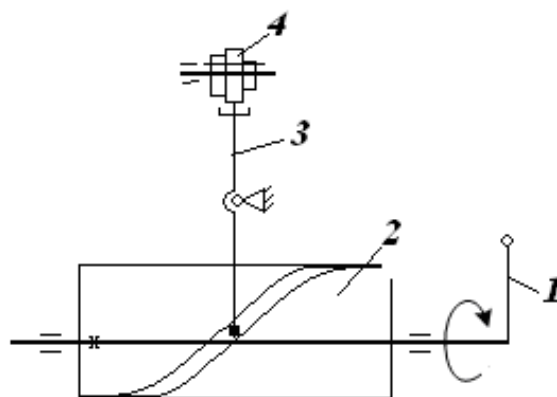


Рис. 5.79. Принципиальная схема механизма переключения скоростей:

1 – рукоятка; 2 – цилиндрический кулачок;  
3 – рычаг; 4 – блок колес

**Пример 114.** Необходимо предложить конструкцию саморегулируемого фильтра.

Предлагается конструкцию фильтра выполнить из ленточного материала по конической винтовой (рис. 5.80).

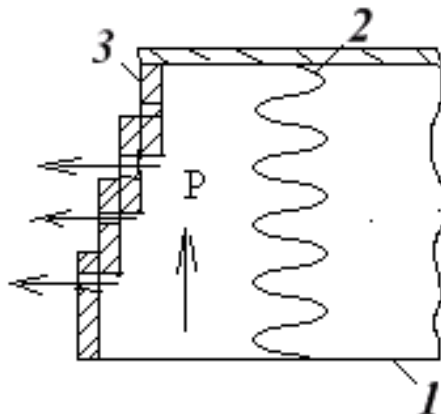


Рис. 5.80. Принципиальная схема фильтра:  
1 – корпус; 2 – пружина; 3 – фильтрующий элемент

Внутри фильтрующего элемента создается переменное давление, которое зависит от степени загрязнения фильтра, и за счет роста давления пластины перемещаются, увеличивая отверстия.

**Пример 115.** Для обеспечения перемещения (больших) рабочих органов станка используется передача «винт–гайка». Необходимо предложить конструкцию устройства, защищающего передачу от попадания абразивных частиц.

Предлагается выполнить защитный кожух из металлической ленты, сформированной по винтовой.

**Пример 116.** Необходимо повысить плавность обработки лезвийного инструмента с переменным сечением срезаемого слоя (фрезы).

Предлагается главные режущие кромки выполнить по винтовой – периферийная фреза с винтовыми режущими кромками.

При работе осевым инструментом для обеспечения удаления стружки из зоны резания вспомогательные поверхности выполняются винтовыми (сверла, зенкеры и т. д.).

**Пример 117.** Необходимо обеспечить высокую точность обработки отверстий в листовых материалах.

Предлагается обрабатывать листовой материал пакетами; режущую кромку инструмента выполнить по винтовой, при которой стружка будет выходить впереди инструмента, обеспечивая прижим листов друг к другу (кательные развертки).

**Пример 118.** Используя датчики обратной связи в конструкциях приводов станков при установке их на ходовые винты, не удастся учесть кинематическую погрешность передачи «винт–гайка». Необходимо предложить корректирующее устройство.

Предлагается скомпенсировать кинематическую погрешность передачи в пределах длины  $l_{px}$ , используя коррекционные линейки, обеспечивающие дополнительный поворот гайки. Эта передача суммирует движение винта и дополнительный поворот гайки.

По аналогии с этим механизмом можно использовать такие передачи для обеспечения рабочих подач при вращении ходового винта и ускоренных перемещений – при дополнительном вращении гайки.

#### 5.6.13.5. Использование свойств шаровых поверхностей

Основные свойства:

- 1) постоянство радиуса кривизны, позволяющее использовать в контакте между элементами кинематики для повышения КПД – подшипники, направляющие, червячные передачи, реечно-червячные;
- 2) хорошее заполнение сложных форм.

**Пример 119.** Необходимо обеспечить закрепление сложных по конфигурации детали.

Предлагается использовать тиски и пространство между деталью и губками заполнить шариками (рис. 5.81).

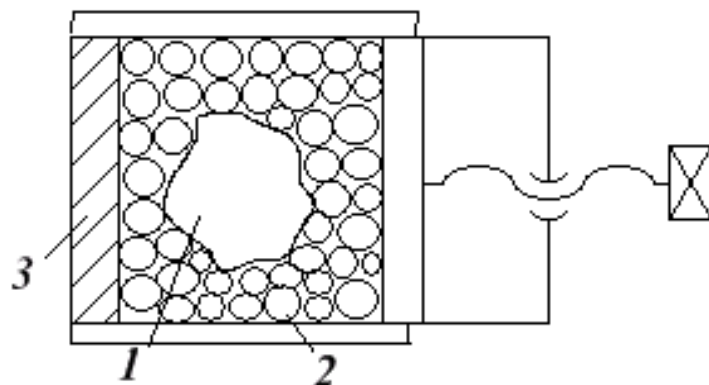


Рис. 5.81. Принципиальная схема закрепления детали:

1 – деталь; 2 – шаровые поверхности; 3 – тиски

Аналогичное устройство используют при производстве деталей сложной формы из листового материала (рис. 5.82).

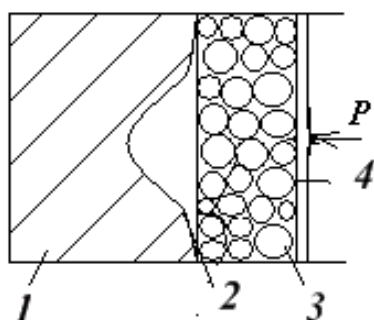


Рис. 5.82. Принципиальная схема штамповки деталей:  
 1 – форма штампа; 2 – листовый материал; 3 – шарики;  
 4 – нажимной упругий элемент

На рис. 5.83 приведена схема роторного передающего механизма.

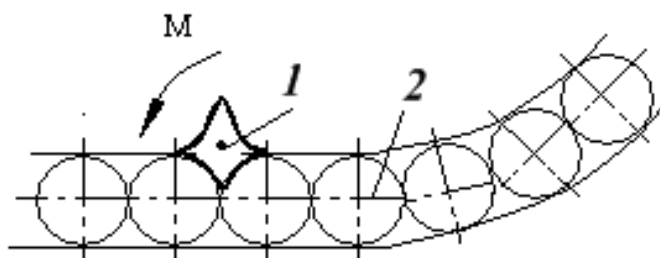


Рис. 5.83. Принципиальная схема роторного передающего механизма:  
 1 – ротор; 2 – шарики

Также шарики могут использоваться при пластической обработке отверстий: путем продавливания шарика (рис. 5.84, а) или раскатки (рис. 5.84, б).

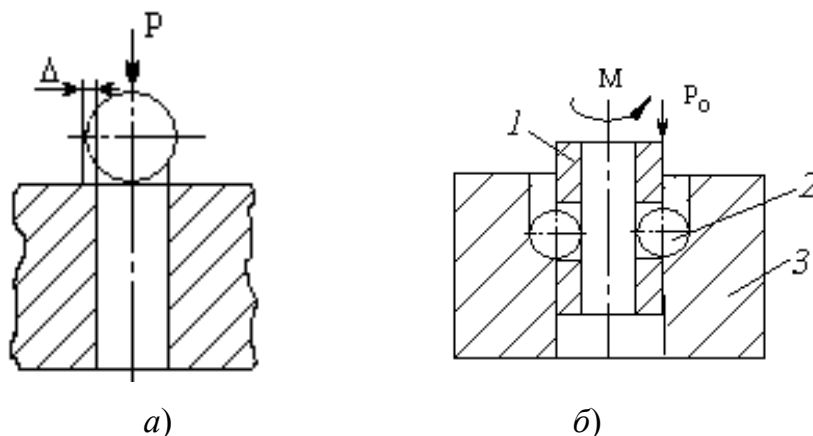


Рис. 5.84. Принципиальные схемы обработки:  
 а – продавливанием; б – раскаткой; 1 – раскатка; 2 – шарики;  
 3 – заготовка

Использование шариков в фиксирующих элементах приведено на рис. 5.85.

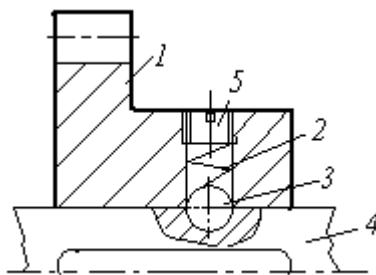


Рис. 5.85. Принципиальная схема:  
1 – зубчатое колесо; 2 – пружина; 3 – шарик; 4 – вал; 5 – винт

Использование шаровых поверхностей:  
– в предохранительной муфте приведено на рис. 5.86:

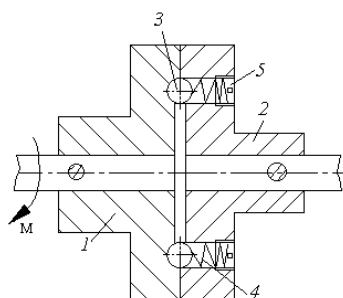


Рис. 5.86. Принципиальная схема предохранительной муфты:  
1, 2 – полумуфты; 3 – шарики; 4 – пружины; 5 – винты

– в конструкциях плавающих патронов (рис. 5.87):

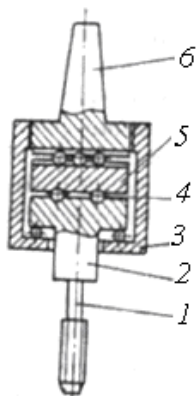


Рис. 5.87. Эскиз плавающего патрона:  
1 – инструмент; 2 – корпус; 3 – гайка; 4 – шарики;  
5 – поводок; 6 – хвостовик



– в быстросменных патронах (рис. 5.88):

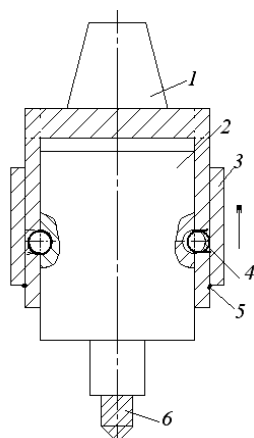


Рис. 5.88. Эскиз быстросменного патрона:  
1 – корпус; 2 – крепежная часть; 3 – втулка; 4 – шарики;  
5 – стопорное кольцо; 6 – режущий инструмент

– в конструкциях обгонных муфт (рис. 5.89):

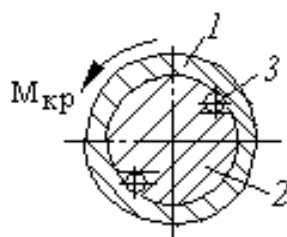


Рис. 5.89. Принципиальная схема обгонной муфты:  
1 – приводная втулка; 2 – ось; 3 – шарики

Такая же конструкция может быть зажимным патроном. Шаровые элементы могут использоваться:

– в конструкциях обратных клапанов (рис. 5.90):

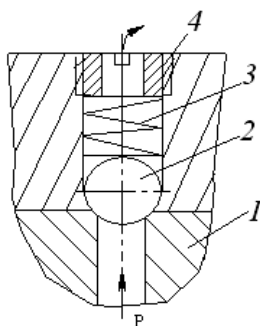


Рис. 5.90. Принципиальная схема обратного клапана:  
1 – корпус; 2 – шарик; 3 – пружина; 4 – заглушка с отверстием

– в конструкциях комбинированных режущих инструментов (рис. 5.91):

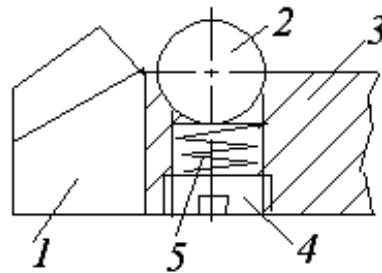


Рис. 5.91. Принципиальная схема комбинированного инструмента:  
 1 – режущий зуб инструмента; 2 – шарик; 3 – корпус;  
 4 – винт; 5 – пружина

– в конструкциях вибраторов (рис. 5.92):

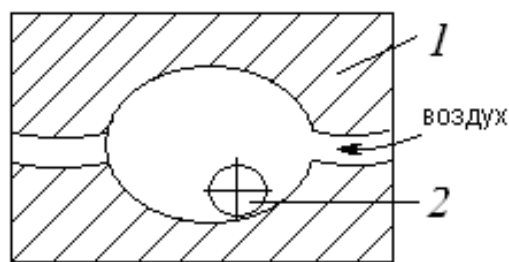


Рис. 5.92. Принципиальная схема вибратора:  
 1 – корпус; 2 – шарик

#### 5.6.13.6. Использование свойств параболоида вращения

**Пример 120.** Парабола – геометрическое место точек  $M$ , равноудаленных от заданной точки  $F$  – фокуса и заданной прямой  $AA'$  (рис. 5.93). Параболу можно определить как кривую, образующуюся при сечении конуса плоскостью параллельно его образующей. Каноническое уравнение параболы имеет вид  $y^2 = 2px$ , где  $p = 2FO$ .

Если вращать параболу вокруг оси  $OF$ , она очертит параболоид вращения. Если из произвольной точки  $M'$  параболы (или параболоида) построить нормаль  $M'N$ , то прямая  $M'F$ , соединяющая эту точку с фокусом  $F$ , и прямая  $PM'$ , параллельная оси параболы, образуют с нормалью равные углы:  $\alpha_1 = \alpha_2$ . Следовательно, при ходе лучей  $P$  параболоид вращения может концентрировать излучения и потоки веществ в фокусе, например: коронный и дуговой разряды, струи газа, солнечный свет, инфракрасное излучение, поток стружки и т. п.

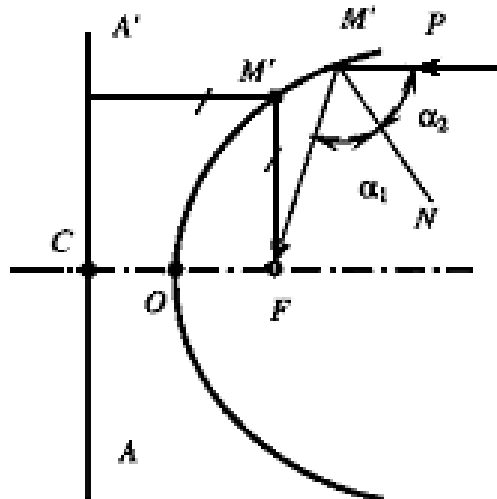


Рис. 5.93. Схема параметров параболоида

Если источник излучения находится в фокусе, то зеркальная поверхность параболоида создает параллельный поток излучения. Эти свойства параболоида используются в прожекторах, радиотелескопах, антеннах.

Принципиальная идея решения этой проблемы возникла давно – зеркало телескопа можно сделать жидким. Еще в 1857 г. английский физик Д. Брюстер предложил вращать чашу, наполненную ртутью, вокруг вертикальной оси. Поверхность жидкого металла в результате взаимодействия силы тяжести и центробежной силы примет параболическую форму. При увеличении скорости вращения параболическая форма поверхности вращающейся жидкости переходит в гиперболическую.

Специалисты считают, что в сочетании с электронной техникой может быть создан жидкий телескоп диаметром около 30 м. Регулируя скорость вращения этого зеркала, можно измерять его фокусное расстояние. Более того, используя застывающие полимеры, точно таким же образом можно изготавливать и сами параболоиды вращения, регулировать кривизну поверхностей. Нашло применение и отрицательное свойство жидкого зеркала – изменять свой профиль при малейших наклонах. По этому принципу могут быть построены различные датчики, например – землетрясений.

#### 5.6.13.7. Использование свойств эллипсоида

**Пример 121.** Если внутреннюю поверхность эллипсоида вращения выполнить отражающей, то лучи, исходящие из одного фокуса, обязательно соберутся в другом. Эллипсоид позволяет фокусировать

не только свет, но и звуковые, ультразвуковые, ударные волны. В случае если в собирающем фокусе  $F'$  нет объектов, луч дважды отразится от поверхности и вернется в исходный фокус  $F$ . В частности, используется для дополнительного разогрева нити ламп с инфракрасным излучением.

Известно, что если насадка для брандспойта выполнена в виде трубки, которая имеет в двух соседних сечениях взаимно перпендикулярные овалы, то длина истекающей струи, по сравнению с обычным брандспойтом, увеличивается без дополнительных затрат на 30 %. Аналогично, если жидкость подается тангенциально в камеру, выполненную в виде эллипсоида, то дальность струи увеличивается до 27 %.

Интересными свойствами обладают эллиптические передачи. При зацеплении эллиптических колес передаточное отношение и усилие изменяются в процессе вращения.

#### ***5.6.14. Использование эффектов изменения расположения***

***Пример 122.*** В начале 70-х гг. XIX в. П. Н. Яблочков пытался решить проблему создания надежного регулятора для дуговой лампы.

Угольные электроды выгорали, увеличивалось расстояние между электродами, и дуга в лампе гасла. Над этой задачей бились многие изобретатели. Дуговые лампы имели сложный механизм сближения угольных стержней, который плохо работал.

Яблочков нашел оригинальное решение. Оказалось, что достаточно было поставить угольные электроды вертикально, параллельно, изолировав друг от друга каолиновой прокладкой определенной толщины. Это решение он запатентовал во Франции в 1876 г.

Однако работа лампы на постоянном токе приводила к тому, что положительный электрод (анод) выгорал быстрее катода. Это также приводило к увеличению расстояния между электродами. Такую задачу можно решить несколькими способами. Один из них – ресурс пространства. Если один из электродов выгорает быстрее, то его нужно сделать длиннее, сохранив при этом постоянный зазор. Следовательно, он должен быть не прямым, а изогнутым в пространстве.

Можно также сделать их одинаковыми, но изменить форму и размеры сечения одного из них.

Ресурс пространства можно использовать в виде двух приемов:

1) проанализировать форму объекта, посмотреть нельзя ли ее изменить, чтобы получить нужное свойство;

2) проанализировать взаимное расположение объектов; наклонить, повернуть, поменять их местами, использовать пустое пространство, расположить один объект внутри другого (принцип матрешки), проверить, рационально ли используется пространство.

**Пример 123.** Измерение давления сварочной дуги. Задачу можно решить, используя два приема: введением поля – дополнительной сварочной дуги, и использовать ресурс пространства – дугу зажать сбоку, в районе точки подвеса коромысла (рис. 5.94, б).

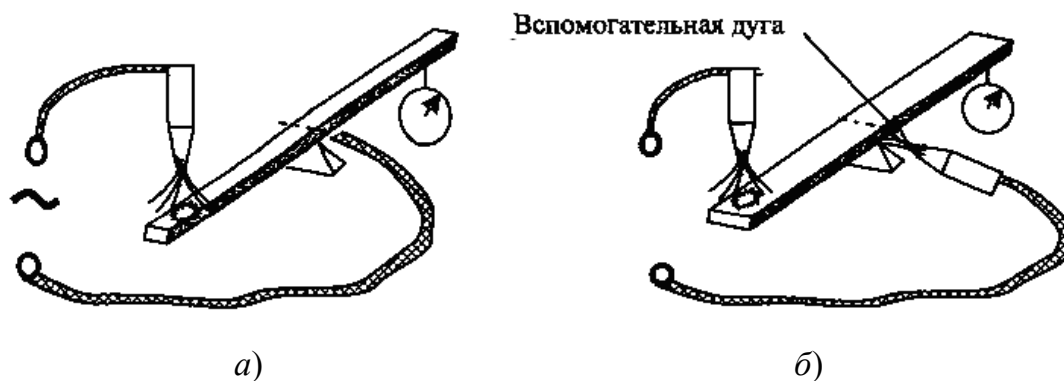


Рис. 5.94. Схемы для измерения давления сварочной дуги:  
 а – жесткий провод снижает точность измерений; б – повышение точности измерения при использовании полевой связи вместо вещественной

**Пример 124.** В середине XX в. проводили исследования процесса сварки. Нужно было провести наблюдение за формой сварочной дуги, плавлением сварочной проволоки и формой сварочной ванны при изменении режимов сварки (рис. 5.95). Для этого решили снять процесс на киноплёнку.

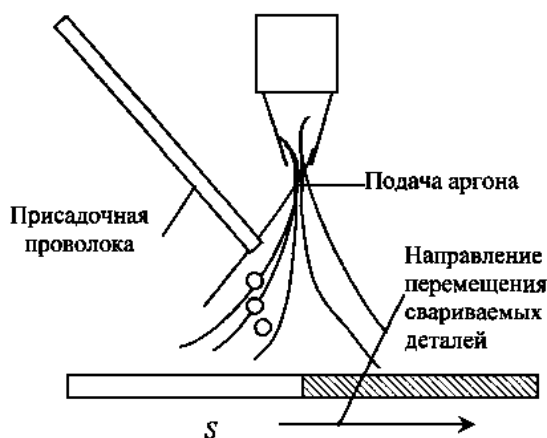


Рис. 5.95. Схема процесса электросварки:  
 S – подача

Когда пленку проявили, то на ней хорошо была видна яркая дуга. Однако контуры сварочной ванны и расплавленных капель видны не были.

Задачу попытались решить введением еще одного компонента – зажгли вторую дугу, расположенную за кинокамерой, которая освещала капли и сварочную ванну. После проявления кинопленки оказалось, что ванна и контуры основной дуги перестали просматриваться. Тогда вторую дугу синхронизировали с работой камеры таким образом, что она освещала место сварки через кадр.

Известно, что бетон хорошо воспринимает сжимающие нагрузки, но плохо работает на растяжение. В строительстве используются предварительно напряженные конструкции.

**Пример 125.** От ветровой нагрузки Останкинская телебашня раскачивается, возникает изгибающий момент. Следовательно, возможно появление зон с растягивающими напряжениями.

Для того чтобы при эксплуатации в Останкинской телебашне не возникли растягивающие напряжения, внутри нее расположили специальные тросы и в процессе строительства натянули их так, что создали заранее сжимающее напряжение в бетоне.

**Пример 126.** «Однажды в институте зерна академик Лисицын сказал изобретателю Качугину, что состоится заседание по важнейшей научной проблеме – борьбе с жуком-долгоносиком. Нужно исследовать условия его существования и, в частности, определить точную температуру тела жучка. Приборов, позволяющих решить такую задачу, в то время не было.

– Тема стоит пятьдесят тысяч, но неизвестно, можно ли на эти средства сконструировать нужный прибор, – сказал с озабоченностью академик.

– Зачем строить прибор? Температуру долгоносика можно измерить обыкновенным медицинским термометром, – ответил Качугин.

Лисицын посмотрел на изобретателя так, как смотрят на человека, который сделал вид, что понял устройство паровоза, а сам уточняет, в каком месте к паровозу пристегивают лошадей.

Но Качугина не смутил этот взгляд.

– Надо набрать стакан долгоносиков, закрыть его, чтобы долгоносики не расползлись, и через отверстие в крышке опустить в середину стакана медицинский термометр. Через некоторое время он покажет температуру тела долгоносиков. А вы подумали, что я предложу ставить термометр долгоносику под мышку?

Академик задумался на минуту.

– Возможно, вы правы, – сказал он.

Опыт показал, что Качугин был прав.

Качугин легко решил задачу потому, что за деревом смог увидеть лес. Когда один объект объединяется с другими такими же объектами, образуется система, обладающая некоторыми новыми качествами. Собранные в стакан жучки сохраняют свою температуру, но измерить ее у массы жучков намного легче, чем у одного жука».

### **5.6.15. Задачи на обнаружение и измерение свойств объекта**

Обнаружение и измерение величин, характеризующих свойства веществ и полей, относится к задаче получения информации. При этом можно выделить два вида величин:

1) характеризующие свойства полей – фазовые переменные, например: напряжение и сила электрического тока, сила и скорость в механике, а также величины, характеризующие состояние объектов (веществ), например, распределение температуры, давления, которые по существу являются полевыми характеристиками;

2) характеризующие свойства веществ, или компонентов, входящих в ТС, например: масса, момент инерции, электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, теплопроводность и т. д.

В зависимости от способа регистрации результатов измерений различают два вида средств измерений:

– *измерительные приборы* – предназначены для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем;

– *измерительные преобразователи* – предназначены для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

При построении вепольных моделей задач контроля примем следующие обозначения. Если полевая характеристика регистрируется измерительным прибором и непосредственно наблюдается, то обозначим ее  $P_{\text{вых}}$  (табл. 5.15).

**Вепольные модели задач на обнаружение и измерение параметров полей**

Прием решения задачи	Вепольная схема	Пример
Введение вещества-преобразователя (для измерительного прибора)	$\begin{array}{c} \mathbf{П}_1 - \mathbf{В} \\ \quad \quad \quad \diagdown \\ \quad \quad \quad \mathbf{П}_{\text{ВЫХ}} \end{array}$	Контроль температуры: В – термометр, биметаллическая пластина для измерения температуры; манометр для измерения давления; $\mathbf{П}_{\text{ВЫХ}}$ – наблюдаемое значение
Введение поля и вещества, которое хорошо с ним взаимодействует	$\begin{array}{c} \mathbf{П}_2 \\ \quad \quad \quad \swarrow \\ \mathbf{П}_1 - \mathbf{В} - \mathbf{П}_{\text{ВЫХ}} \end{array}$	Контроль герметичности: $\mathbf{П}_2$ – ультрафиолетовое излучение; В – люминатор; $\mathbf{П}_{\text{ВЫХ}}$ – наблюдение мест утечки
Введение поля, взаимодействующего с измеряемым полем, и вещества-преобразователя	$\begin{array}{c} \mathbf{П}_{\text{ИЗЛ}} \\ \quad \quad \quad \swarrow \\ \mathbf{П}_1 - \mathbf{В} - \mathbf{П}_{\text{ВЫХ}} \end{array}$	Радиографический метод контроля сварных соединений: $\mathbf{П}_1$ – расположение дефектов; $\mathbf{П}_{\text{ИЗЛ}}$ – рентгеновское излучение; В – рентгеновская пленка; $\mathbf{П}_{\text{ВЫХ}}$ – расположение дефектов на пленке
Введение вещества – измерительного преобразователя ( $\mathbf{В}_{\text{ИП}}$ ) и энергетического поля для работы измерительного преобразователя	$\begin{array}{c} \mathbf{П}_3 \\ \quad \quad \quad \swarrow \\ \mathbf{П}_1 - \mathbf{В}_{\text{ИП}} - \mathbf{Ф}_\Pi \end{array}$	Измерение температуры: $\mathbf{В}_{\text{ИП}}$ – терморезистор; $\mathbf{П}_3$ – электрическая энергия; $\mathbf{Ф}_\Pi$ – напряжение (показания милливольтметра)
Введение поля и вещества-посредника, которое хорошо с ним взаимодействует, и вещества измерительного преобразователя	$\begin{array}{c} \mathbf{П}_d \\ \swarrow \quad   \quad \searrow \\ \mathbf{П}_1 - \mathbf{В}_2 - \mathbf{В}_1 \\ \quad \quad \quad   \\ \quad \quad \quad \mathbf{Ф}_{\text{ВЫХ}} \end{array}$	Контроль герметичности масс-спектрометрическим методом: $\mathbf{П}_d$ – поле давлений; $\mathbf{В}_2$ – гелиево-воздушная смесь; $\mathbf{В}_1$ – масс-спектрометр; $\mathbf{Ф}_{\text{ВЫХ}}$ – величина утечки
	$\begin{array}{c} \mathbf{П}_m \\ \swarrow \quad \quad \searrow \\ \mathbf{П}_1 - \text{---} - \mathbf{В}_1 \\ \quad \quad \quad   \\ \quad \quad \quad \mathbf{П}_{\text{ВЫХ}} \end{array}$	Магнитопорошковый метод контроля качества материалов: $\mathbf{П}_m$ – магнитное поле; $\mathbf{В}_1$ – ферромагнитный порошок; $\mathbf{П}_{\text{ВЫХ}}$ – распределение порошка на поверхности

В процессах контроля часто регистрируются обе характеристики ( $\mathbf{П}_{\text{ВЫХ}}$  и  $\mathbf{Ф}_\Pi$ ). Например, при испытаниях на герметичность крупногабаритных конструкций масс-спектрометрическим методом определяют место течи –  $\mathbf{П}_{\text{ВЫХ}}$  и величину течи  $\mathbf{Ф}_\Pi$  (ее считывают с измерительного



прибора, но, по сути, она является фазовой переменной и показывает массовый расход газа в единицу времени).

Физические поля несут в себе определенную энергию, поэтому для их обнаружения и измерения может оказаться достаточным использовать вещество, которое проявляет некоторое свое свойство и тем самым позволяет обнаружить или измерить это поле, например, магнитное, гравитационное и т. д.

Для измерения полей, которые не несут в себе энергию, часто требуется проводить энергию к исследуемому объекту, например, измерение толщины покрытия емкостным методом. Иногда можно обойтись и без подведения энергии, например, определение наличия вещества в объекте с помощью другого вещества – индикатора, определение толщины покрытия по скорости его растворения каплей реагента (кислоты, щелочи).

По способу определения значения измеряемой величины измерительные приборы подразделяются на две группы: *приборы прямого действия* (индикатор часового типа, пружинные весы) и *приборы сравнения* (рычажные весы, концевые меры, предельные калибры).

Ход рассуждений можно построить следующим образом:

1. Какую выходную характеристику нужно получить ( $\Pi_{\text{вых}}$  и  $\Phi_{\text{п}}$ )? Нужен ли измерительный прибор или измерительный преобразователь?
2. Измерение должно быть прямым или косвенным?
3. Какие вещества и (или) поля лучше всего использовать? Как организовать связи между ними? Какие ФТЭ можно использовать?
4. Какие другие свойства вещества или поля (связанные с интересующим) легче обнаружить или измерить?

### **5.6.16. Метод отрицания и конструирования**

Процедура применения метода сводится к трем последовательным этапам:

1) для исследуемого объекта составляется перечень основных его характеристик (признаков, свойств), которые участвуют в выполнении его главной полезной, основной, вспомогательной или дополнительной функции;

2) каждое из выявленных свойств поочередно заменяется некоторыми другими свойствами, которые характеризуют иное качество объекта. Изменив хотя бы одно свойство объекта, можно получить новый системный эффект. Если это полезный эффект, то его можно использовать для улучшения ТУ;

3) конструируется объект с новым свойством. Остальные свойства оставляют теми же, что и в исходном объекте.

Отношение заменяемого свойства к исходному может быть трех видов (рис. 5.96).



Рис. 5.96. Виды отношений между изменяемыми свойствами

Заменяемое *совместимое* свойство характеризует другое качество объекта. Это свойство совместимо со свойством, присущим объекту, т. е. наличие этого свойства у объекта не конфликтует с другими свойствами объекта и не противоречит назначению этого ТО и выполняемой им ГПФ.

Заменяемое *несовместимое* свойство – это такое свойство, при внесении которого ТО не может выполнять какую-либо из своих функций, т. е. это свойство изменяет назначение ТО.

Несовместимое свойство может находиться:

- в отношении противоречия (например, трансмиссия: жесткая либо гибкая, система управления с обратной связью и без обратной связи);
- в отношении противоположности к заменяемому свойству (например, цвет объекта – красный, синий; характер движения – прямолинейное, вокруг оси, в плоскости).

## 5.7. Использование законов и закономерностей строения и развития технических систем

Законы техники как научная теория и система знаний могут быть получены различными путями [10].

1. Выведением из наиболее общих законов природы, т. е. дедуктивным способом. В этом случае законы техники будут носить объективный характер и иметь хорошую теоретическую базу.

2. Выявлением законов техники на основе анализа описаний изобретений, путем выявления приемов, которые могли привести к решению проблемы, и их обобщения до уровня формулировки закона, а также на основе анализа истории развития техники и выявления закономерностей ее развития. Это индуктивный способ выведения законов. В этом случае сформулированный закон будет носить вероятностный характер.

3. Переносом законов, принципов, действующих и выявленных в одной области техники и в природе, в другую область, т. е. путем аналогий.

Законы техники, как и научная теория, должны объяснять возникновение, строение, функционирование и обосновывать направления развития ТС. Они должны быть увязаны с систематикой приемов решения инженерных задач.

### ***5.7.1. Закон увеличения степени идеальности технических объектов***

***Формирование идеального конечного результата.*** Идеальный конечный результат – постановка задачи по выполнению полезных функций безо всяких затрат.

Понятие идеальности продуктивно тем, что, во-первых, эта модель, эта абстракция выдвигает цель, к которой надо стремиться при решении технической задачи. Во-вторых, образ ИТР позволяет выделить те стороны ТО, те его свойства, которые являются доминирующими для решаемой проблемы. В-третьих, образ ИКР направляет мышление на поиск скрытых, неявных ресурсов, которые могут быть использованы для решения задачи. У человека, решающего задачу, формируется мотивация для выбора перспективного направления поиска решения.

В формулировке ИКР всегда присутствует кажущаяся невозможность, парадоксальность, например, крыша сама очищается от снега, трубопровод сам регулирует свое сечение, затонувший корабль сам всплывает на поверхность.

***Пример 127.*** В начале зимы водосточные трубы, как правило, забиваются льдом. Весной лед начинает оттаивать, и возможны ситуации, когда ледяная пробка, подтаяв с внешней стороны и потеряв сцепление с трубой, летит вниз. Удар о выступающие части конструкции часто приводит к обрыву труб. Если же ледяная пробка падает на тротуар, то

она может стать причиной травм находящихся вблизи людей. Выколачивание льда – дорогое и малоэффективное мероприятие.

В этой задаче можно рассматривать ТС, состоящую из двух компонентов: труба и лед. Идеальный конечный результат может быть применен к обоим компонентам. Здесь важно сформулировать требования к этим компонентам.

Можно представить следующие образы ИКР: лед сам удерживается в трубе до момента полного таяния. Труба и лед держатся друг за друга до момента полного таяния. Лед сам держится за трубу той частью, которая растает в последнюю очередь.

Эти образы, идеализирующие абстракции дают направления поиска решения задачи.

Например, в а. с. № 771291 описано такое решение: внутри трубы поместить отрезок произвольно изогнутой проволоки, закрепив ее верхним концом к скату крыши (рис. 5.97). В предложенном решении видно, что пропущенная внутри трубы проволока позволяет приблизиться к ИКР, определенно для льда: лед сам удерживается внутри трубы до полного таяния. Для решения задачи здесь использован прием: введение в систему еще одного компонента – вещества.

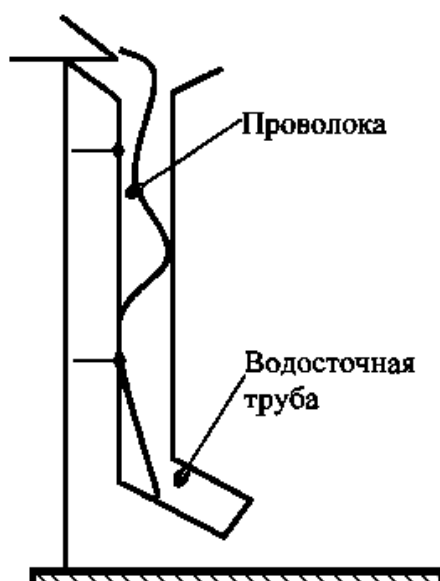


Рис. 5.97. Эскиз конструкции

Увеличение эффективности ТО может осуществляться по двум принципиально разным направлениям:

1) главная полезная функция или количество выполняемых функций ( $\Phi_{п}$ ) остается неизменным, а масса ( $M$ ), габариты ( $\Gamma$ ), энергоемкость ( $\Xi$ ) технической системы стремятся к нулю ( $M\Gamma\Xi \rightarrow 0$ );

2) масса, габариты, энергоемкость ТС остаются неизменными, а качество выполнения ГПФ или количество выполняемых функций ( $\Phi_n$ ) увеличивается.

**Пример 128.** Грузовой автомобиль, перевозящий 3 т груза, весит 1,5 т. Треть энергии затрачивается на то, чтобы возить саму конструкцию. Грузовик, рассчитанный на 15 т груза, весит всего 5 т. Доля «мертвого» груза значительно снижается, а именно это и приближает машину к идеальной. Кроме того, 140-тонный самосвал разгружается за 15 с, а это намного меньше времени, необходимого для разгрузки пятитонных машин [15].

Турбогенератор мощностью 100000 кВт, построенный в начале 50-х гг. XX в., весит около 200 т, а его младший брат постройки середины 70-х гг. при мощности 500000 кВт – около 400 т, т. е. мощность, приходящаяся на 1 т его веса, возросла в 2,4 раза.

Повышение идеальности ТС может происходить как в рамках существующей конструктивной концепции, так и в результате радикального изменения конструкции, перехода на другой принцип действия системы. Например, переход от паровозов к тепловозам затем к электровозам. Переход от радиоламп к полупроводниковым приборам позволил не только повысить КПД устройств, но и их надежность.

Увеличение функционального эффекта ( $\sum \Phi_n$ ) может осуществляться за счет совершенствования выполнения ГПФ и за счет расширения области применения ТО, т. е. создания *универсальных* технических средств, которые могут выполнять несколько близких (по качеству или количеству) функций.

Уменьшения факторов расплаты ( $\sum \Phi_p$ ) можно достичь за счет *специализации*, т. е. путем уменьшения количества выполняемых функций. Функциональная ниша разделяется. Создаются специальные технические устройства, узко ориентированные на выполняемую функцию.

Например, создан ряд специализированных автомобилей: машины для уборки мусора, поливки улиц, снегоуборочные, пожарные и т. д.; это же характерно для военных самолетов: разведчики, бомбардировщики, истребители; специализация режущего инструмента, например, резцы токарные: обдирные, черновые, чистовые, резьбонарезные и др.

Например, токарно-винторезный станок – универсальное оборудование, на котором можно выполнять самые разнообразные работы: получение наружных и внутренних цилиндрических, конических, фасонных поверхностей, нарезание внутренних и наружных резьбовых

поверхностей. В принципе на нем можно выполнять шлифовальные, фрезерные и строгальные работы, но это неэффективно, поскольку есть специальные станки, которые лучше приспособлены для этих работ. Однако каждый из перечисленных видов обработки, например, нарезание резьбы, используется только некоторое время из общего времени работы токарного станка. Следовательно, в остальное время часть функций простаивает. Таким образом, затраты на создание функции произведены, а функция используется редко.

Специальное оборудование, как правило, меньше используется по времени (например, снегоуборочная техника), поэтому специализация оказывается полезной, если удастся его полностью загрузить.

В процессе развития ТС циклы «специализация – универсализация» повторяются несколько раз. Например, для середины XX в. резьбонарезные и токарные станки существенно отличались приводами и системой инструментообеспечения. У современных станков инструментальные насадки практически сравнялись – возник единый вид – многоцелевые станки. Еще один пример – грузовые автомобили: крупногабаритные для междугородних перевозок и малые маневренные для внутригородского использования.

В 80-х гг. XX в. в СССР выпускалось около 3000 марок сталей. Такая сверхспециализация вынужденная, поскольку не было возможности создать материал, который перекрывал бы весь диапазон требуемых свойств.

В Японии разработан напильник из дешевой незакаленной стали, насечка покрыта сверхтвердой керамикой (карбид ванадия). Слой толщиной в 3 мкм не только защищает материал от коррозии, но и в 5–6 раз повышает ресурс, позволяет обрабатывать твердые сплавы.

### **5.7.2. Закономерность стадийного развития**

Анализ истории техники позволил выделить четыре стадии (этапа) развития ТО.

1. В ТО реализована только *технологическая функция* – физико-химическое воздействие на объект исполнительным органом. Технический объект представляет собой устройство, которое состоит из РО, хотя в нем могут быть и некоторые передаточные элементы – трансмиссия, например: нож, зуб, инструмент.

2. Наряду с технологической функцией, в ТО реализуется функция преобразования энергии. Структура ТО усложняется, к РО добавляются ПЭ, Тр, ОУ.

3. В ТО реализуется функция управления. В структуру ТО встраивается система управления, измеряющая некоторые параметры и определяющая значения параметров других компонентов ТО.

4. В ТО реализуется функция планирования. В структуру ТО добавляются компоненты, формирующие исходные данные для работы системы управления.

В табл. 5.16 приведен пример, иллюстрирующий основные этапы развития техники.

Таблица 5.16

**Примеры стадийного развития техники**

<b>Стадия развития</b>	<b>Средство обработки абстрактной информации</b>	<b>Средство обработки физических объектов</b>
1. Ручные орудия	Счетные палочки, счеты, логарифмическая линейка	Токарный станок с ручным, затем с ножным приводом
2. Механизация – возникновение и развитие машин. Характеризуется наличием трех основных звеньев: преобразователя энергии, передаточных устройств и рабочего органа	Электромеханический арифмометр, электрические калькуляторы, ЭВМ 1-го поколения	Токарный станок с ручным управлением с приводом от гидроколеса, паровой машины, электродвигателя
3. Детерминированные автоматизированные производящие системы. Реализована функция контроля и коррекции регулярно протекающего процесса, имеется блок управления ТС	ЭВМ 2- и 3-го поколений, ПЭВМ, базы данных	Токарный станок с числовым программным управлением с «жесткой» записью программы на магнитной ленте, перфоленте
4. Недетерминированные самоуправляющиеся системы. Выполняется функция анализа ситуации и принятие решения	Базы знаний	Гибкие автоматизированные производственные системы

Из закономерности стадийного развития вытекает важное следствие, что переход к каждой новой стадии возможен после того, как предыдущая стадия получит достаточное научное и техническое развитие. При этом невозможно перескакивать через одну или несколько стадий развития. Например, бессмысленно оснащать ТО приводом,

если нет РО. Невозможно оснащать ТО системой управления, если не исследованы закономерности его функционирования и не созданы соответствующие модели. Невозможно создать экспертную систему, базу данных, не создав предварительно хорошо работающую базу данных в рассматриваемой предметной области.

На каждой стадии развития очередная полезная функция реализуется, как правило, с помощью универсальных устройств, – происходит заимствование средств из другой технической области. Затем начинается дифференциация и специализация этих средств. Это непосредственно следует из закона повышения идеальности ТО.

**Пример 129.** С начала XX в. в развитии ряда технических отраслей прослеживается тенденция освоения электромагнитных волн все более высокой частоты. В середине XX в. в радиотехнике и радиоэлектронике начинает активно осваиваться оптический диапазон (появляются оптоэлектронные приборы), а также инфракрасная область (разрабатываются тепловизоры, инфракрасная оптика).

В начале 60-х гг. XX в. появляются первые лазеры, а чуть позже создаются оптические волокна. В 1970 г. американская фирма «Корнинг» разработала кварцевое волокно с малым затуханием – порядка 20 дБ/км.

За 10 лет для кварцевых оптических волокон удалось уменьшить потери примерно на два порядка. В начале XXI в. уже производятся оптические волокна с затуханием порядка 0,15 дБ/км. Во многом этому способствовало развитие технологии производства оптических волокон. Расширяется область применения этой техники. Сначала это были уникальные лабораторные установки, затем технологическое оборудование и, наконец, товары народного потребления, например, лазерные проигрыватели, считывающие и записывающие устройства.

С середины XX в. прослеживается тенденция микроминиатюризации в радиоэлектронной аппаратуре. Толщина проводников уменьшается от нескольких миллиметров до нескольких микрометров. Увеличивается плотность компоновки, возрастает количество вентиляций на единицу объема. Ряд показателей микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры удваивается каждые 10 лет (закон Мура).

Совершенствование ТО продолжается до тех пор, пока существует потребность в производстве ТО, основанном на ФПД. Если нет условий перехода на новый принцип действия, то в процессе конструктивной эволюции рост эффективности замедляется и длительное время воспроизводятся ТО с близкими по значению показателями качества.



### 5.7.3. Закономерность свертывания–развертывания технической системы

*Развертывание* ТО – процесс присоединения новых функциональных компонентов.

Процесс *свертывания* ТО характеризуется тем, что в ТС уменьшается число компонентов. Функции упразднения компонентов передаются другим компонентам или в НС.

**Пример 130.** В одном изобретении для точного определения угла поворота какого-либо объекта предложено укреплять на нем прозрачную пластинку с голографической записью всех возможных углов (в градусах и минутах). Через пластинку-голограмму пропускают луч света от лазера, который, преломляясь в пластинке, высвечивает на экране угол поворота прямо в цифровой информации – без измерителей угла, без считывающих и преобразующих устройств, без электронных индикаторов и прочих устройств.

Процессы свертывания и развертывания всегда сопровождаются появлением точек *бифуркации* (от лат. *bifurcus* – раздвоенный), т. е. разделения, разветвления.

**Пример 131.** Для повышения боевой живучести самолетов на топливные баки из алюминиевых сплавов устанавливали протектор из резины. В простреленном протектированном баке резина набухала в бензине, и отверстие затягивалось.

**Пример 132.** На рис. 5.98 показана схема развития фрезерного станка. Необходимо отметить, что это развитие сопровождалось расширением технологических возможностей: точности обработки, увеличением числа одновременно управляемых координат в оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ); повышением производительности труда.

Ось вращения шпинделя вертикально-фрезерного станка расположена вертикально и перпендикулярно плоскости стола.

Одним из первых усовершенствований вертикально-фрезерного станка было устройство поворота шпинделя – линия динамизации. Это увеличило его технологические возможности.

Оснащение фрезерного станка электромеханическими и гидроконтрольными устройствами существенно повысило точность и производительность обработки – *развертывание* ТС.

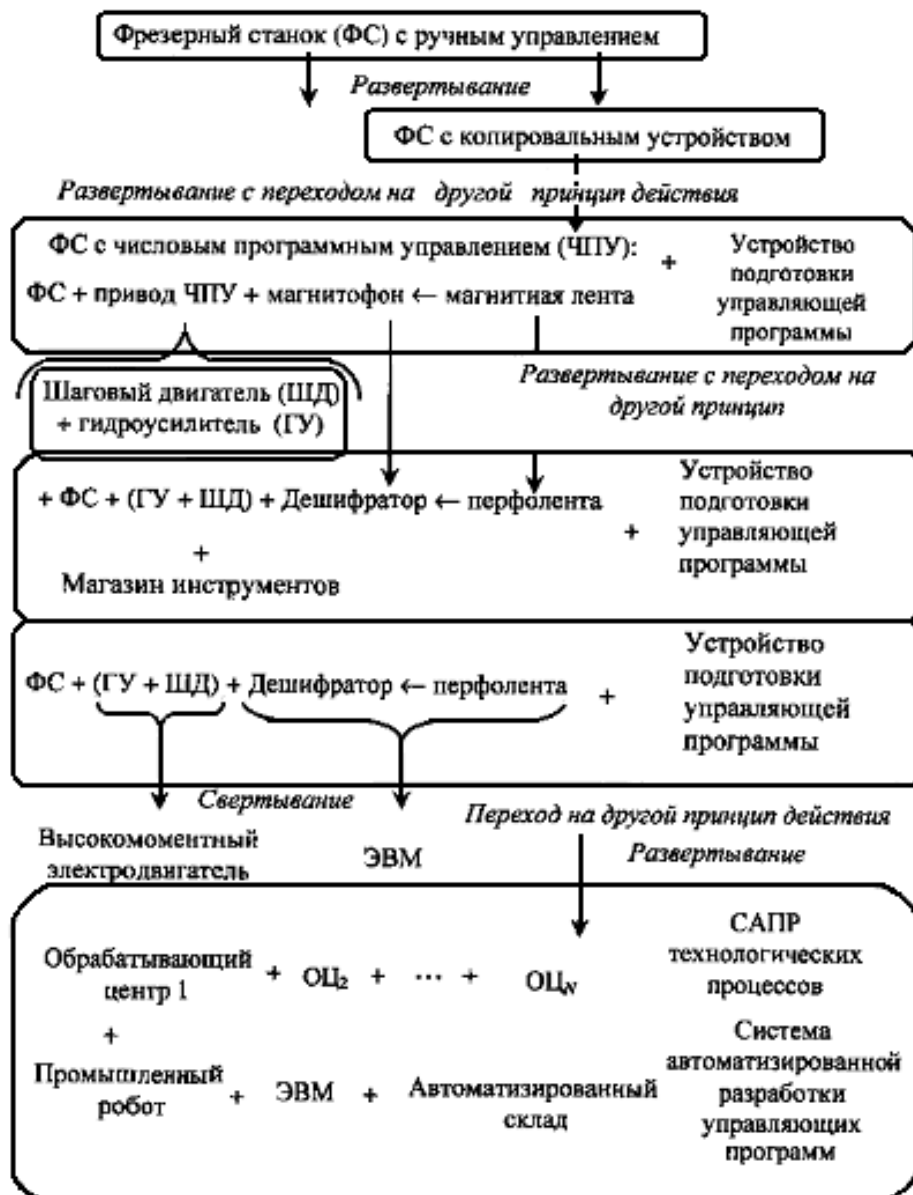


Рис. 5.98. Схема развития ТС для фрезерной обработки

Большим прогрессом было оснащение фрезерного станка числовым программным управлением (ЧПУ). Это можно рассматривать как образование бисистемы с переходом на новый принцип управления. Оно, в свою очередь, привело к созданию автоматизированных систем подготовки управляющих программ для оборудования с ЧПУ. Импульсы, записанные на магнитной ленте, считывались магнитной головкой, усиливались и поступали на шаговый электродвигатель (ШД). Но требования к приводу стола фрезерного станка таковы, что он должен создавать большие усилия и небольшую скорость перемещения. Если сделать ШД, создающим большой крутящий момент, то он получится громоздким, тяжелым, а это уменьшит его быстроходность –

он теряет точность при отработке команд. Поэтому ШД сделали быстросходным, легким, но он не напрямую управлял перемещением стола, а через гидромотор. Станок оснастили емкостью с маслом (порядка 100 л) и мощным гидромотором. Габариты станка резко увеличились (*развертывание*).

Затем на смену ШД, работавшему совместно с гидроусилителем, пришел высокомоментный электродвигатель (свертывание части системы). Новый принцип управления потребовал введения в систему датчиков обратной связи. Система управления с ШД была разомкнутой. Свертывание системы в одном месте привело к развертыванию ее в другом месте.

Аналоговая форма записи программы (импульсы, записанные на магнитной ленте) была заменена кодированной, записанной на перфоленте. Это привело к тому, что в системе управления станка появился дешифратор (*развертывание*).

Затем к станку добавили магазин инструментов (*развертывание*), позволяющий существенно увеличить технологические возможности оборудования и повысить производительность труда.

Развитие вычислительной техники привело к усложнению аппаратуры управления станком. Управляющая программа стала храниться непосредственно в ЭВМ станка, что позволило существенно сократить время ее отладки.

Следующий этап развертывания связан с созданием гибких автоматических переналаживаемых линий, включающих несколько станков с ЧПУ и центральную ЭВМ, которая решает также и задачи планирования, обеспечивая полную загрузку всех рабочих мест.

**Пример 133.** Получен штамм микробов, съедающих краску с пустых алюминиевых банок. На это уходит примерно 30 мин. Затем чистый алюминий отправляют в переплавку. Применение бактерий заменит существующие технологии, при которых краску удаляют сжиганием (при этом сгорает 15 % металла и загрязняется воздух) или отмывают органическими растворителями, что вредно для здоровья.

**Пример 134.** В бедных металлургических выработках в специальных отстойниках разводят колонию тионовых бактерий, переводящих медь в раствор. Раствор, насыщенный бактериями, закачивают в пробуренные скважины и затем поднимают на поверхность. Простой химической обработкой из раствора получают чистую медь. Аналогично используют серобактерии, железобактерии. С помощью литотрофных бактерий в США получают 10 % от общего объема всей производимой в стране меди.

#### ***5.7.4. Закономерность взаимосвязанного и неравномерного развития***

Потребность в материалах со специальными свойствами привела к созданию композитных материалов, а это, в свою очередь, потребовало разработки технологии производства: теории, методов и технологического оснащения изготовления конструкций из композитных материалов, разработки методов и средств контроля их качества.

Расширяется область применения материализованных принципов действия. Созданные в этой области принципы, методы, ФПД и устройства со временем находят применение в ТО других областей. Например, ультразвуковые колебания нашли широкое применение в гидролокации морского дна, поиске косяков рыб, диагностике материалов, в том числе живых тканей, сварке, очистке изделий, в лечебной практике и т. д.

Однако Г. И. Иванов отмечает, что у этого закона есть еще один важный аспект [15]: «Цицерон говорил: «Во всяком войске есть тот, кто идет впереди».

В технической системе впереди идет рабочий орган.

Часто изобретатели совершают ошибку, упорно развивая двигатель, трансмиссию, управление, но не рабочий орган. Никогда такая техника не дает значительного прироста экономического эффекта...».

В металлообработке можно наблюдать, как интенсивно совершенствуется привод, трансмиссия, органы управления – все это направлено на повышение производительности и расширение технологических возможностей обработки. Однако значительной вклад в повышение ГПФ давало совершенствование РО: внедрение твердого сплава в качестве режущей части (например Т15К6), эльбора, применение инструмента с изменяемой геометрией, наложение ультразвуковых колебаний на режущий инструмент и, наконец, изменение принципа действия: электрофизические и электрохимические методы обработки, повышение технологических характеристик процессов объемного формирования, порошковой металлургии для изготовления деталей.

#### ***5.7.5. Закономерность спирального развития техники***

В истории развития техники многократно наблюдались случаи использования принципов действия, которые когда-то давно применялись, а затем от них отказались по каким-либо причинам. Но насту-

пает время, когда этот принцип действия или способ возрождается на новой основе, на более высоком техническом уровне.

**Пример 135.** В конце 30-х гг. XX в. была создана бакелитовая фанера, в которой использовался фенольно-формальдегидный клей. Была разработана технология изготовления обшивок самолетов методом выклейки из древесного шпона на синтетических клеях, с применением резиновых мешков, при помощи которых создавалось давление при склейке.

Армированные композиционные материалы (КМ) представляют собой металлическую или полимерную матрицу, упрочненную высокомодульными волокнами бора и углерода, карбидов и нитридов металлов, а также высокопрочными волокнами металлов или дисперсными частицами кислородных соединений, которые обладают высоким модулем упругости, прочностью, жесткостью, жаропрочностью. Например, композитный материал – алюминий, армированный бороволокном (50 % объема), обладает прочностью 1100...1200 МПа (110...120 кг/м<sup>2</sup>). (У самых высокопрочных конструкционных алюминиевых сплавов 500...550 МПа (50...55 кг/м<sup>2</sup>). Его модуль упругости составляет 250000 вместо 70000 МПа, а предел усталости – 600 МПа, вместо 150...160 МПа у применяемых в настоящее время алюминиевых сплавов.

Таким образом, развитие техники идет, образно говоря, по спирали, возвращаясь в своем развитии к старым решениям, но на следующем витке – на более высоком техническом уровне. Недаром в жизни бытует афоризм «Все новое – это хорошо забытое старое». Поэтому каждому специалисту необходимо знать историю развития техники не только в своей области, но и в смежных отраслях, систематизировать принципы действия, которые применялись в различных технических решениях, в том числе и ранних, и это позволит находить их новое применение.

#### ***5.7.6. Принцип соответствия функции и структуры***

Проектирование – процесс синтеза технического устройства, обладающего таким набором свойств, которые необходимы для выполнения объектом заданных функций.

При разработке новых ТО инженер решает целый комплекс задач, связанных с выбором или формированием принципа действия ТО, разработкой его структуры. Для успешного решения этого комплекса задач необходимо знать и использовать закономерности строения

и функционирования ТС, которые относятся к универсальным системообразующим принципам.

Принцип соответствия функции и структуры – наиболее общий принцип строения ТО, который можно сформулировать следующим образом [10]. В ТО *каждый компонент и каждая связь между компонентами должны выполнять определенную функцию, необходимую и достаточную для обеспечения работы его в целом.*

Полезное действие ТО обычно характеризуется описанием на качественном уровне, например, создать давление для формирования детали, обнаружить наличие вещества в смеси веществ. Результату функционирования часто можно дать количественную оценку.

Оценка функционирования ТО может быть представлена различными величинами. С одной стороны, это величины, которые характеризуют само действие, например: сила, давление, электрическое напряжение, скорость, коэффициент усиления и т. д. С другой стороны, это параметры, характеризующие качество функционирования, например: чувствительность прибора, точность измерения, линейность характеристики и т. д.

У ТО, разработанного в виде проекта на уровне технического или конструкторского решения или уже существующего в металле, фактические функциональные параметры, как правило, отличаются от требуемых. Это отличие может приводить к тому, что функция компонентов или связей выполняется либо недостаточно, либо избыточно.

В любой ТС недопустима не только недостаточность выполняемой функции, но и ее избыточность. О последнем условии часто забывают при создании различных объектов.

Избыточность функции, выполняемой компонентом системы, это не только лишние затраты, но и неэффективная работа других компонентов системы и снижение эффективности выполнения ГПФ. Поэтому при создании ТО стремятся не допускать функциональной избыточности, например, нам не нужен слишком острый столовый нож, слишком яркая настольная лампа, слишком сильная вентиляция и т. д. В ТО часто встречается избыточная прочность, долговечность (продукция устаревает «морально», но все еще работоспособна).

В социотехнических системах функциональная избыточность может выражаться, например, в дублировании функций различными подразделениями, что приводит к безответственности. Или если руководитель дает задачу подразделению и указывает, в каком направлении искать решение, то он тем самым сужает область поиска возможных решений и формирует у исполнителя ВПИ.

Иногда в техническое решение могут изначально закладываться избыточные связи, например, жесткая печатная плата устанавливается в корпус и закрепляется в четырех точках. Избыточность точек крепления может приводить к нежелательным явлениям: например, из-за производственных погрешностей четвертая точка не попадает в плоскость крепления – возникают монтажные напряжения, при неравном нагреве корпуса или его деформации по другим причинам он будет создавать изгибные напряжения в плате.

**Пример 136.** При разработке схемы базирования заготовок для их обработки на станках руководствуются правилом шести точек. В общем случае для определения тела в пространстве необходимо задать шесть координат: три – линейных и три – угловых. Число координат, необходимых для определения положения тела в пространстве, называется степенями свободы. При базировании заготовок лишние связи накладывать нельзя. Наложение лишних связей приводит либо к неопределенному или неустойчивому положению заготовки при ее закреплении, либо к появлению сил, которые нежелательным образом деформируют заготовку при ее закреплении или приводят к заклиниванию деталей в подвижных соединениях приспособления.

При изготовлении заготовки и приспособления (рис. 5.99, а) невозможно обеспечить перпендикулярность поверхностей  $A$  и  $B$  приспособления и поверхностей  $A'$  и  $B'$  заготовки. При закреплении заготовки это может привести к возникновению опрокидывающего момента и, следовательно, к нечеткой фиксации заготовки по базирующим поверхностям. В схеме базирования, показанной на рис. 5.99, а, наложены лишние связи.

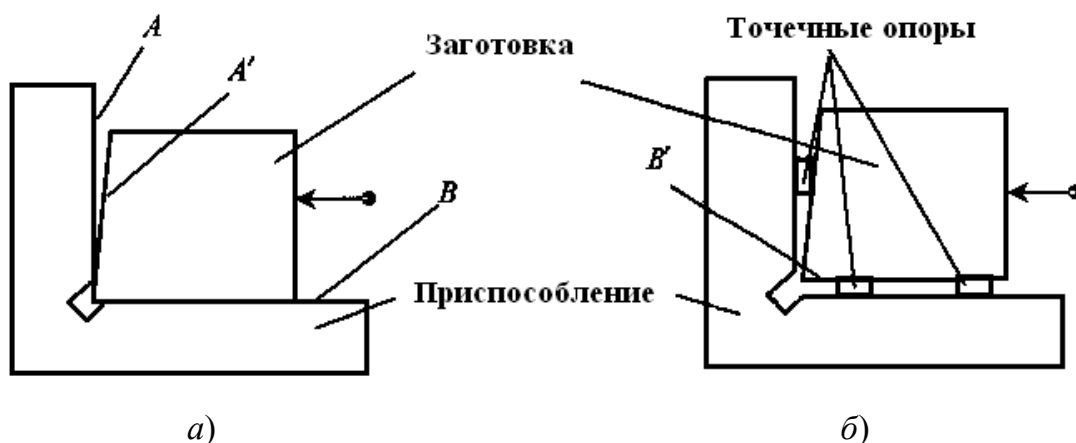


Рис. 5.99. Схема установки призматической заготовки в приспособление:  
а – наложены лишние связи; б – правильно

При базировании по схеме, показанной на рис. 5.99, б, этого явления не будет, так как количество наложенных связей не превышает количества степеней свободы заготовки.

Для определения положения оси цилиндрической заготовки по координате  $Y$  (рис. 5.100, а) достаточно одной призматической опоры.

Если закрепить заготовку в двух призмах (рис. 5.100, б), избыточность наложенных связей приведет к возникновению боковой силы, которая может приводить к заклиниванию подвижного соединения. Это связано с тем, что вследствие погрешностей изготовления приспособления оси подвижной и неподвижной призм не совпадут.

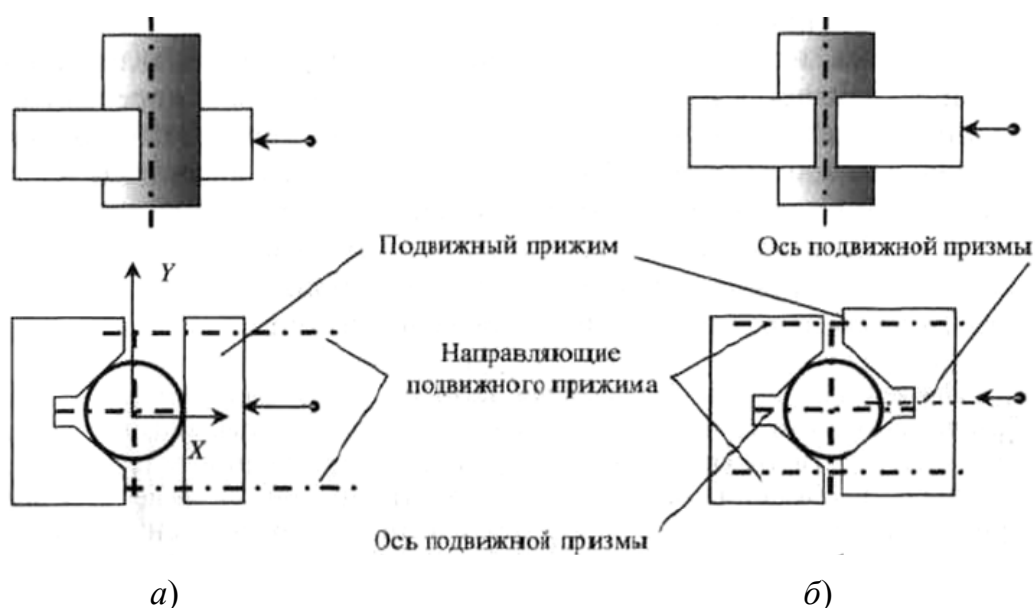


Рис. 5.100. Схема базирования цилиндрической заготовки:  
а – правильно; б – наложены лишние связи

Лишние связи могут проявляться как требования различных нормативных систем. Например, для печатных плат бортовой аппаратуры требуется высокое значение собственных частот колебаний. Для уменьшения прогиба платы и уменьшения изгибных деформаций выводов радиоэлементов частота платы должна быть по крайней мере в два раза больше частоты собственных колебаний системы амортизации устройства, чтобы избежать совместного резонанса. Этого можно добиться закреплением платы в нескольких точках (от четырех до шести). С позиции теории базирования получаются лишние связи.

**Пример 137.** Для повышения теплоотдачи транзистора его закрепляют в радиаторе. Чтобы динамические нагрузки от массы транзистора и радиатора не воспринимались местом пайки транзистора, радиатор тоже закрепляют на плате (рис. 5.101).



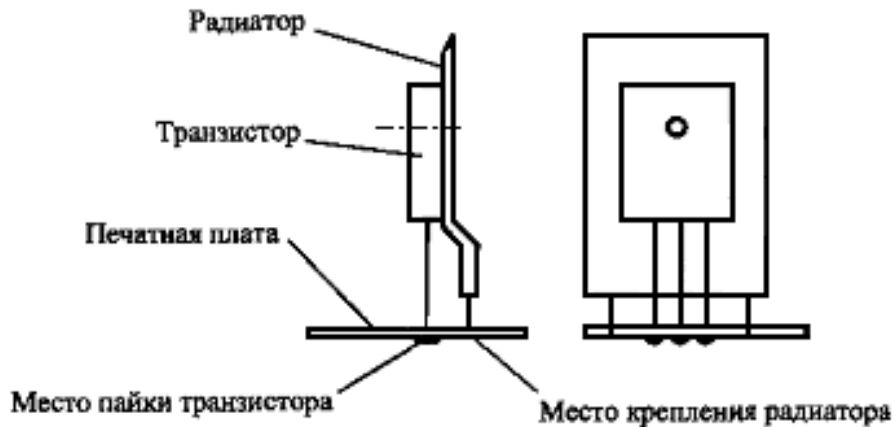


Рис. 5.101. Пример скрытой избыточности связей

Получается статически неопределимая система, в которой при изменении температуры транзистора и радиатора возникают деформации. Эти деформации приводят к тому, что в ножках транзистора могут возникать растягивающие или сжимающие напряжения, вследствие чего возникает опасность нарушения контакта либо в месте припайки к плате, либо в заделке самого транзистора. Возможен даже отрыв места пайки ножки транзистора от печатной платы.

Обнаруженный недостаток не очевиден. Поэтому здесь можно говорить о скрытой избыточности, которую можно обнаружить при всестороннем анализе условий работы технического устройства.

При создании любого объекта необходимо соблюдать принцип достаточности. Человек стремится одеться по погоде, чтобы не было ни холодно, ни жарко, домохозяйке, наверное, не нужна сумка, в которой можно носить 50 кг (за прочность надо платить).

**Пример 138.** При проектировании конструкции тонкостенных оболочек, работающих на сжатие, стремятся к тому, чтобы максимально использовать механические характеристики материала конструкции. Для этого форму и размеры сечений выбирают и рассчитывают таким образом, чтобы критические напряжения потери устойчивости максимально приближались к напряжениям предела текучести материала конструкции. Если критические напряжения потери устойчивости будут меньше предела текучести материала, то при этом не в полной мере будут использоваться механические характеристики материала конструкции, т. е. материал конструкции позволяет выдерживать еще большие нагрузки, но конструкция теряет устойчивость. Можно сказать, что функциональные характеристики материала конструкции избыточны или жесткость конструкции недостаточна.

### **5.7.7. Принцип энергетической проводимости**

*Связи между всеми компонентами ТС должны обеспечивать сквозной проход энергии ко всем ее частям.* Этот принцип характеризует внутреннюю связь между компонентами ТС и относится как к строению, так и к функционированию ТО.

Если не вся подводимая к компоненту энергия проходит через него к следующему компоненту или преобразуется в другой вид, то происходит либо накопление энергии в этом компоненте, которая, как правило, идет на его разрушение, либо в нем происходит рассеивание энергии. И то, и другое ухудшает функционирование ТО.

Группа 1. ТО, функционирование которых направлено на преобразование потоков энергии, веществ и сигналов (информации). Это устройства, которые предназначены либо для изменения каких-либо объектов (изделий), либо для обнаружения или измерения свойств веществ и полей.

Группа 2. Статические системы, представляющие собой относительно жесткие конструкции, назначением которых является определение положения других ТО в пространстве и сохранение неизменными своих форм и размеров под действием внешних нагрузок, например, емкости, фермы, строительные сооружения.

**Пример 139.** В Японии разработан способ использования ветровой энергии для обогрева помещений. Ветросиловая установка вращает колесо компрессора, сжимающего воздух, который при этом нагревается до 170 °С. Прямое преобразование энергии ветра в тепловую, минуя промежуточную стадию – получение электроэнергии, оказалось в шесть раз эффективнее.

В любом преобразователе энергии в трущейся паре происходит выделение энергии. Указанное нежелательное явление, помимо расточительности, вредно еще и тем, что часть этой энергии идет на разрушение ТО, например износ пар трения.

На основе принципа сквозного прохода энергии были разработаны следующие рекомендации (приемы):

- 1) стремиться к использованию в ТО одного вида энергии;
- 2) использовать вещества, которые хорошо проводят поля, имеющиеся в системе;
- 3) плохо управляемое поле заменять хорошо управляемым;
- 4) если компоненты ТО должны образовать энергопроводящую систему, то они должны содержать вещества с близкими свойствами по отношению к этому энергетическому полю;

5) если требуется разорвать энергетические связи, то в ТС следует ввести вещества с противоположными свойствами;

6) для управления процессами вводить в ТС компоненты (вещества), хорошо управляемые полем. Например, обгонная муфта в механических передачах, диод в радиотехнике, обратный клапан в гидросистеме управляются автоматически энергией поля или среды, которое они пропускают. Следовательно, нет необходимости в организации специальных управляющих устройств, которые не только бы усложняли ТС, но потребовали бы дополнительной энергии;

7) В статических системах (ТО второй группы) передача нагрузки осуществляется за счет того, что в конструкции создается поле напряжений, т. е. возникает потенциальная энергия (упругих сил), это поле и передает усилия, например в стержне.

Одним из принципов авиационного конструирования является принцип передачи сил по кратчайшему пути, который способствует получению конструкции минимальной массы. При разводке печатных плат и топологий микросхем также используют критерий минимума длины связей, что улучшает характеристики аппаратуры.

На рис. 5.102 показаны два варианта передачи усилия от точки  $M$  к точке  $N$ . На схеме рис. 5.102, *а* потенциальная энергия, возникающая в стержне, необходима и достаточна для выполнения стержнем заданной функции. На схеме, приведенной на рис. 5.102, *б*, на участке  $ABCD$  возникает изгибающий момент. Потенциальная энергия упругих сил в конструкции во втором случае будет больше, чем в первом. Изгиб стержня приводит к дополнительному накоплению потенциальной энергии, которая, в принципе, не нужна для передачи силы  $F$  от точки  $M$  к точке  $N$ . Потенциальная энергия, возникающая от изгибающего момента, является избыточной для выполняемой функции.

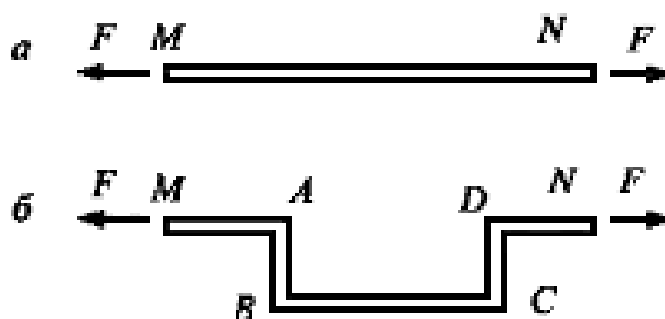


Рис. 5.102. Схема конструкции для передачи усилия:  
*а* – по прямой; *б* – при обходе препятствия

С учетом этого, применительно к статическим системам, принцип энергетической проводимости выражается в том, что в ТС не должно быть областей или компонентов, в которых накапливалась бы неиспользуемая энергия.

Например, глушитель в автомобиле предназначен для гашения звуковых колебаний. При этом теряется несколько процентов мощности. А можно ли использовать эту энергию, чтобы она не просто рассеивалась, а выполняла одновременно полезную работу?

### **5.7.8. Принцип согласования–рассогласования**

*Необходимым условием успешного функционирования ТС является согласованное взаимодействие его с НС и согласование работы всех его компонентов между собой.* Согласованию подлежат все материалы, форма, размеры, структура, ритмика действия, потоки веществ и энергии, т. е. различные свойства и параметры, характеризующие как компоненты ТО, так и связи между ними.

*Внешнее согласование* – согласование рассматриваемого ТО с компонентами НС, т. е. с человеком, факторами внешней среды и ТО, в состав которого входит рассматриваемый объект.

*Внутреннее согласование* – согласование между компонентами рассматриваемой ТС.

Одним из направлений согласования является создание систем с высокой живучестью и безопасностью, т. е. выход из строя какого-либо компонента или связи между компонентами не должны приводить к разрушению других компонентов ТО или возникновению вредного воздействия на них, или на компоненты НС: окружающую среду, человека.

**Пример 140.** Часто в средствах массовой информации сообщается о пожарах в зданиях из-за неисправностей электропроводки. Однако электропроводка защищена от короткого замыкания предохранителем, который обесточивает сеть при коротком замыкании. Почему же тогда происходит возгорание?

Сечения проводов должны быть согласованы как с мощностью потребителей электроэнергии (по потребляемому току), так и с максимальным током предохранителя.

Представим себе, что произойдет, если, например, к настольной лампе подвели удлиненный провод меньшего сечения. Лампа небольшой мощности, ток тоже небольшой – провод функционирует нормально, не греется, т. е. согласование с потребителем энергии

есть. Однако если в настольной лампе произойдет пробой изоляции, то по этому проводу потечет большой электрический ток. Сечение провода уменьшено, поэтому он будет иметь большое сопротивление. Следовательно, значение тока будет меньше тока срабатывания предохранителя. Провод начнет нагреваться, он может раскалиться так, что проводка будет гореть, зажигая легковоспламеняющиеся материалы, с которыми он находится в контакте.

Если бы сечение провода было согласовано с предохранителем, то через провод пошел бы ток, от которого сработал бы предохранитель.

*Согласование по качеству* – согласование по проявляемым свойствам рассматриваемых компонентов.

Например, материалы, работающие в агрессивной среде, как правило, не должны образовывать электрохимической пары, (например, если это металлические зубные протезы), а иногда должны образовывать такую пару (например, если это устройство защиты от коррозии в морской воде – протекторная защита).

*Согласование по количеству* – согласование связей по фазовым переменным и параметрам, характеризующим те или иные свойства компонентов.

Например, мощность трансформатора должна быть согласована с суммарной мощностью потребителей энергии (внутреннее по функционированию); скорость резания должна быть согласована с характеристиками обрабатываемого материала, материалом режущей части инструмента и его геометрией (внутреннее и внешнее). При производстве интегральных микросхем концентрация легирующей примеси  $p$  или  $n$  типа должна быть согласована с температурой и временем диффузии для формирования проводящих областей требуемой конфигурации.

Если изменяется значение хотя бы одного выходного параметра, то необходимо изменить и внутренние параметры (компонентов и связей) ТО вследствие их взаимосвязи. Например, мощность токарного станка связана с максимальным диаметром обрабатываемой заготовки, жесткостью элементов конструкции и диапазоном скоростей вращения шпинделя.

Для гаек установлены определенные соотношения между диаметром и шагом резьбы, высотой гайки и размером под ключ.

Размеры элементов сечений стандартных профилей (уголки, тавры, двутавры, швеллеры) также находятся в определенной пропорции между собой при изменении площади их поперечного сечения.

Приведенные примеры относятся к так называемому статическому согласованию.

При создании ТО большое значение имеет *динамическое согласование* – согласование ритмики работы всех частей ТС: периодичности действия, частотное согласование.

*Динамическое согласование* имеет свои особенности для ТО первой и второй групп.

В радиоэлектронных устройствах стремятся согласовывать собственные частоты усиленного контура с частотой обрабатываемого сигнала; при поточном производстве в автоматической производственной линии все операции должны выполняться за одно и то же время, называемое тактом выпуска.

Здесь речь идет о согласовании, которое не следует непосредственно из требований выполнения главной полезной функции.

Для ТО второй группы, наоборот, требуется *рассогласование* собственных частот колебаний конструкции с частотой внешней нагрузки, например, по «правилу октавы», в соответствии с которым собственные частоты связанных между собой колебательных систем должны отличаться более чем в два раза. В противном случае из-за явления резонанса происходит лавинообразное усиление амплитуды колебаний и разрушение конструкции, так как коэффициенты резонансного усиления связанных подсистем перемножаются.

Известно, что резонанс (фр. *resonance* – дающий отзвук) – явление сильного возрастания амплитуды колебаний (электрических, механических, звуковых и т. д.) под влиянием внешних воздействий, когда частота собственных колебаний системы совпадает с частотой колебаний внешнего воздействия.

**Пример 141.** В 1985 г. в Мехико произошло разрушительное землетрясение. Американские специалисты установили, что причиной этому была большая длительность и то, что частота толчков совпала с собственной частотой колебаний почвы и ряда зданий. Резонанс в шесть раз усилил действие подземных толчков.

При проектировании летательных аппаратов необходимо, чтобы собственные частоты элементов конструкции не совпадали с частотой вибраций, которые создает двигатель и другие источники. При проектировании турбин, мостов, летательных аппаратов стремятся избавиться от возникновения вибраций и принимают меры, чтобы вибрации, создаваемые одними устройствами, не совпадали с собственными частотами других устройств во избежание негативных резонансных явлений.

Однако эффект резонанса часто используется для получения положительного результата при осуществлении полезной функции. Например, для перемещения заготовок может использоваться вибробункер. Если частота вынужденных колебаний совпадает с собственной частотой бункера (вместе с заготовками), установленного на упругом основании, то существенно уменьшается энергопотребление этого транспортного устройства. Энергия расходуется в основном только на гистерезисные потери упругого основания (например пружины).

Резонансные явления в природе и технике следует отличать от *автоколебаний*, когда в объекте возникают колебательные процессы, хотя внешняя нагрузка не носит колебательный характер. На этом явлении основаны духовые музыкальные инструменты, генераторы колебаний в радиоэлектронных устройствах.

Из истории развития авиации известно, что с ростом скоростей самолетов конструкторы столкнулись с такими явлениями, как флаттер – изгибно-крутильные колебания консоли крыла, бафтинг – изгибные колебания хвостового оперения, шимми – изгибные колебания стойки шасси.

При обработке резанием возникают вибрации, которые ухудшают качество обрабатываемой поверхности, но если они совпадут с собственными частотами колебаний в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь», то может произойти поломка инструмента и т. п.

Таким образом, анализируя прототип или получив первоначальный набросок проектируемого технического решения, необходимо проверить ТО на соответствие принципа согласования-рассогласования. Это позволит избежать ряда нежелательных явлений, которые могут обнаружиться в изготовленном техническом устройстве.

### ***5.7.9. Принцип симметрии***

Симметрия в переводе с греческого означает соразмерность, а в широком смысле это геометрическое свойство, характеризующее некоторую регулярность, правильность формы тела.

Виды симметрии изучаются в математике, физике, биологии, кристаллографии и других науках. В технике широко используют различные виды симметрии. При этом рассматривают симметрию не только как геометрическое свойство, но и распространяют ее на физические свойства и параметры, характеризующие различные объекты. Исследования в этой области позволили выделить 11 видов симметрии.

1. *Билатериальная симметрия* характеризует объекты, которые можно разделить плоскостью на две равные части, при этом плоскость симметрии зеркально отображает одну половину объекта в другую. Такой вид симметрии (обозначается  $m$ ) встречается во многих ТО, для которых основное функционирование связано с перемещением в среде, а также в тех, которые тесно взаимодействуют с человеком. Например: корпус самолета (рис. 5.103, а), корабля, автомобиля, столовые приборы.

2. *Аксиальная симметрия* характеризует объекты, которые имеют ось симметрии, т. е. такую прямую линию, при полном обороте вокруг которой обводы поверхности объекта несколько раз совпадут сами с собой. Число таких совмещений  $n$  за один полный оборот называется порядком оси ( $2 \leq n \leq \infty$ ). Например: гребной винт (рис. 5.103, б), колесо центробежного насоса – порядок симметрии равен количеству лопаток, цилиндр – осевую симметрию бесконечного порядка.

3. *Комбинация плоскости симметрии с осью симметрии, лежащей в плоскости симметрии*, обозначается  $n \cdot m$ . Например, бытовой штепсельный разъем имеет симметрию  $2m$ , шайба ( $\infty \cdot m$ ), гайка (рис. 5.103, в).

4. *Комбинация оси симметрии с перпендикулярной к ней плоскостью симметрии*. Эти объекты не имеют плоскостей, проходящих через ось симметрии. Например, наливные мельничные колеса, вертушка анемометра (рис. 5.103, г).

5. *Комбинация главной оси симметрии с продольными и поперечными плоскостями симметрии*. Например, вал, блок (рис. 5.103, д) имеют бесконечное число плоскостей симметрии, проходящих через его ось, и плоскость симметрии, перпендикулярную оси.

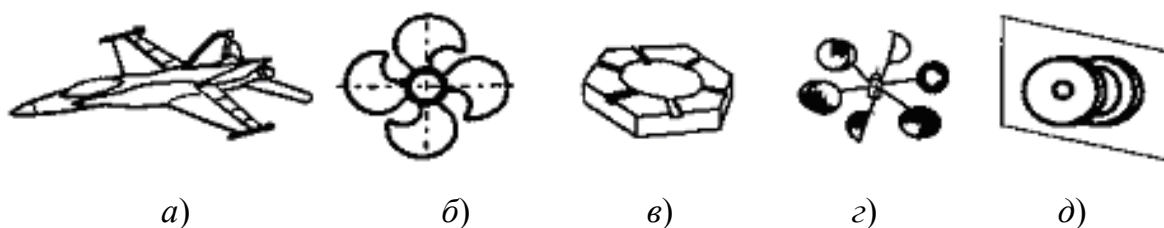


Рис. 5.103. Примеры симметрии:

- а – билатериальная; б – аксиальная; в – комбинация плоскости симметрии с осью симметрии, лежащей в этой плоскости;
- г – комбинация оси симметрии с перпендикулярной к ней плоскостью симметрии; д – комбинация главной оси симметрии с продольными и поперечными плоскостями симметрии



6. *Центральная точечная симметрия.* Этот вид симметрии характеризуется наличием особой точки, через которую могут проходить несколько групп осей симметрии разных порядков и, соответственно, несколько групп плоскостей симметрии.

Например, куб (рис. 5.104) имеет: три оси порядка 4, проходящие через противоположные вершины; четыре оси порядка 3, проходящие через середины противоположных граней; шесть осей порядка 2, проходящие через середины противоположных ребер, и девять плоскостей симметрии. Симметрию куба можно записать в виде формулы:  $3L_44L_36L_29PC$ .

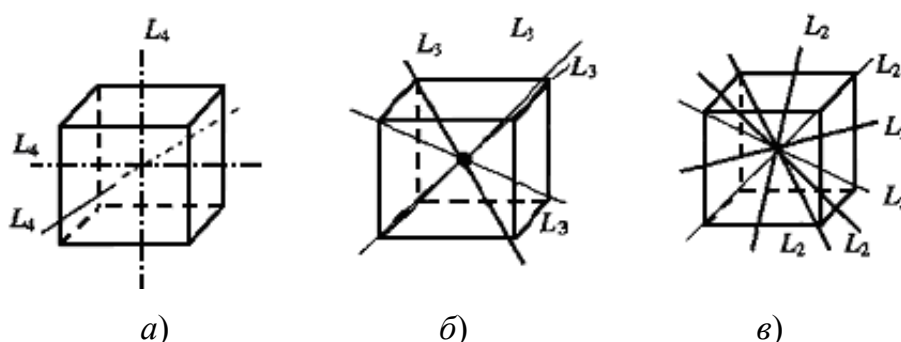


Рис. 5.104. Комбинация главной оси симметрии с продольными и поперечными плоскостями симметрия куба:  
 а – три оси порядка 4; б – четыре оси порядка 3;  
 в – шесть осей порядка 2

Самая простая фигура – шар – обладает самой сложной симметрией: бесконечное число осей порядка  $\infty$  и плоскостей симметрии.

7. *Плоскость скользящего отражения.* Этот вид симметрии относится к бесконечным фигурам и представляет собой совокупность плоскости симметрии и параллельно ей поступательного движения, которые действуют совместно.

8. *Винтовая ось.* Этот вид симметрии также относится к бесконечным фигурам. Она представляет собой сложное перемещение элемента: вращательное движение вокруг оси симметрии и поступательное движение вдоль оси, которые действуют совместно.

Симметрия в виде винтовой оси широко используется в технике, например, шнек, спиральные пружины, винтовые поверхности.

По винтовым линиям часто располагаются ветви на деревьях, листья на стеблях.

9. *Криволинейная симметрия (гомология).* Ромб имеет две плоскости симметрии, проходящие через его диагонали  $AC$  и  $DB$  (рис. 5.105, а).

Если посмотреть на ромб через сферическое или цилиндрическое зеркало, то контуры его изменятся. На рис. 5.105, б видно, что линия  $DB$  сохранила свойство делить пополам отрезки  $a_i c_i$ , как на рис. 5.105, а.

При движении жидкости в искривленном трубопроводе профиль скоростей симметричен относительно средней линии.

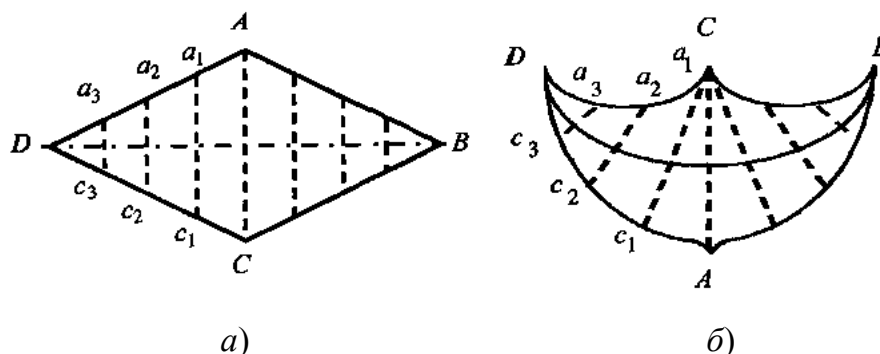


Рис. 5.105. Искривление контуров ромба – при отражении его в сферическом (а) или цилиндрическом (б) зеркале

10. *Антисимметрия.* Это симметрия своей противоположности. Антисимметричны: деталь – слепок; фото негатив – фото позитив; гравюра – клише; позитрон – электрон; капля воды в воздухе – пузырек воздуха в воде и т. д. Например, графики изменения потенциальной и кинетической энергии маятника – антисимметричны.

11. *Дисимметрия.* При анализе природных и искусственно созданных объектов был выявлен еще один вид симметрии – дисимметрия. Л. Пастер назвал дисимметричной такую фигуру, которая не может быть совмещена простым наложением со своим зеркальным отражением. Например, трехмерный неправильный тетраэдр не может быть совмещен со своим зеркальным отражением. Одну из зеркально равных дисимметричных фигур называют правой, другую – левой. Например, левые и правые: рука, ботинок, перчатки. Ножницы тоже дисимметричны, они сделаны под правую руку.

**Пример 142.** Для точной чистовой обработки отверстий применяют многолезвийный размерный инструмент – развертку. Развертка позволяет получать отверстия с точностью 10–7 квалитета. Если у развертки, например, 12 зубьев, то угол между режущими кромками составляет не  $30^\circ$ , а  $33^\circ 30'$ ,  $36^\circ$ ,  $37^\circ 30'$ ,  $39^\circ$ . Неравномерность углового шага способствует получению отверстия без огранки, снижению вибраций при развертывании, что уменьшает шероховатость поверхности. В этом ТО применен прием объединения компонентов со смещенными характеристиками, который дает положительный системный эффект.

На основании принципа Кюри и анализа природных объектов были обнаружены следующие две закономерности:

1) если организованная система испытывает однонаправленное воздействие среды в виде пучка параллельных сил и силы тяжести, не совпадающей с воздействием среды, то такая организованная система приобретает билатериальную симметрию. Этот вид симметрии имеют все объекты, которые должны перемещаться в пространстве: живые организмы, транспортные средства, а также ТО, осуществляющие обработку потоков вещества, например: плотина, мост, мясорубка;

2) если организованная система испытывает равновероятное со всех сторон воздействие среды в виде сил, лежащих на параллельных плоскостях, и силы тяжести, направленной перпендикулярно действию среды, то такая организованная система приобретает аксиальную симметрию. Например: растения, башни.

Эти две закономерности отражают характер взаимодействия не только природных объектов с внешней средой (в природе это наблюдается весьма отчетливо), но и искусственно созданных объектов.

*Симметрия причины порождает симметрию следствия.*

Горка песка в пустыне под действием ветра получит билатериальную симметрию.

Свойства симметрии широко используются в инженерной практике. Например, если конструкция и действующие на нее нагрузки симметричны, то количество уравнений, необходимых для ее расчета, уменьшается на единицу.

## **5.8. Решение исследовательских задач**

В постановке исследовательской задачи ставится проблема раскрыть сущность явления, объяснить его причину.

Выделяют два вида исследовательских задач в зависимости от изучаемого объекта.

1. Задачи определения способов решения проблем, связанных с созданием и совершенствованием ТО. Например, ставится задача понять, каким образом удалось конкуренту создать ТО с лучшими показателями, чем существующий? Какие способы и приемы решения задачи были использованы? В частности, каким образом конкуренту удалось снизить расход энергии, обеспечить более высокую точность обработки, повысить чувствительность метода проверки герметичности, повысить качество продукции при снижении затрат на ее изготовление, используя такое же оборудование, как и на вашем предприятии?

2. Анализ причин и объяснение явлений, которые наблюдаются в естественных и искусственно созданных объектах. Например, нужно объяснить, почему происходит единичное или периодически повторяющееся полезное или нежелательное явление. К этому типу задач относятся задачи объяснения природных явлений, решение задач диагностики и поиска неисправностей в ТО.

**Пример 143.** Алмазным инструментом произвели обработку заготовки из мягкого железа. Инструмент затупился. Алмаз – самое твердое вещество. Почему произошло затупление инструмента при обработке мягкого материала?

В условии задачи описана система, которая включает вещества: заготовка из железа, алмазный инструмент, стружка и поля: скорость резания, силовое взаимодействие инструмент – заготовка.

ПП: инструмент затупился – наблюдаемое явление. Инструмент не должен был затупиться, *так как от тверже заготовки.*

Как сделать так, чтобы мягкое железо затупило алмазный инструмент? Известно, что процесс резания сопровождается выделением тепла. Алмаз – это аллотропное состояние углерода.

Как затупить инструмент при имеющихся ресурсах? Нужно создать такие условия, чтобы углерод диффундировал в железо. При высокой температуре и хорошем контакте между железом и углеродом может начаться процесс растворения углерода в железе.

*Методические рекомендации по решению исследовательских задач приемом обращения*

1. Сформулировать исходную постановку задачи.

Например: имеется система, включающая следующие компоненты... При выполнении физической операции ... происходит (наблюдается) явление. Необходимо объяснить, почему это происходит.

2. Сформулировать обращенную задачу. Заменить вопрос: «Почему это происходит?» на вопрос: «Как это можно сделать?»

Таким образом, ставится задача получения в заданных условиях наблюдаемого явления, т. е. ставится задача синтеза.

3. Провести анализ вещественно-полевых ресурсов:

3.1) перечислить все имеющиеся в исходной системе ресурсы, способные в принципе совершить наблюдаемое действие, проявить наблюдаемое свойство: вещества, поля, характер их взаимодействия, влияние человека, окружающей среды;

3.2) рассмотреть ФТЭ, которые могут вызвать наблюдаемое явление, проявиться при взаимодействии имеющихся ресурсов;

3.3) проанализировать возможность проявления синергетических эффектов от взаимодействия имеющихся ресурсов;

3.4) применить оператор имеющихся ресурсов, чтобы получить наблюдаемый эффект.

4. Применить аналогию. Рассмотреть, в каких природных процессах или в технических объектах можно наблюдать подобные явления.

5. Сформулировать противоречия, наметить прием их разрешения и предложить решение. Разрешение ПП будет заключаться в том, что будет найдено объяснение наблюдаемому явлению. Применение приемов разрешения ПП – поиск ресурсов: пространства, времени, введение веществ, полей, проведение количественных изменений в системе для получения наблюдаемого явления.

Намеченный прием разрешения противоречия, по существу, является гипотезой для объяснения явления. Предпочтение следует отдавать самым простым средствам создания наблюдаемого явления.

6. Проверить выдвинутые гипотезы.

### ***5.8.1. Выявление и прогнозирование нежелательных эффектов и явлений в конструкциях и технологиях***

Нежелательные явления, вредные эффекты могут не только ухудшить функционирование ТС, но и привести их к отказу, опасной аварии и катастрофе. Для предупреждения аварий, прогнозирования неблагоприятных сценариев развития ТС и используют инверсный подход.

Таким образом, вместо поиска путей улучшения ТО ставится задача по поиску его недостатков. Но эту задачу тоже можно инвертировать и поставить задачу не искать недостатки в ТО, а *как их создавать*.

Создавать нужно такие дефекты, которые не могут быть обнаружены имеющимися средствами диагностики. Это должны быть скрытые недостатки, дефекты, которые могут проявиться не сразу, а спустя некоторое время или при стечении некоторых обстоятельств. Если ТО является технологический процесс, то нужно придумать условия возникновения брака.

**Пример 144.** В 1978 г. на ленинградском заводе «Электросила» проходило совещание по улучшению работы автоматического выключателя [16].

«На одном из заседаний временной рабочей группы по проведению функционально-стоимостного анализа мощного автоматического выключателя разговор зашел в тупик. Контакты выключателя каза-

лись вполне благополучными, было не ясно, что именно в них нуждается в усовершенствовании. Тогда ведущий задал вопрос: «Допустим, этот контакт идеальный, и мы не можем его улучшить. А как можно его испортить? Причем так, чтобы дефект оказался скрытым».

Предположения посыпались в большом количестве. Среди них оказалось и такое: контакт состоит из двух частей, которые затем спаивают твердым припоем. Если сделать так, чтобы пайка проходила только по периметру площадки соприкосновения, а не по всей поверхности, как это должно быть, этого не заметит никто, при пропуске малых токов ничего плохого не произойдет, но при больших токах из-за возрастания сопротивления спай начнет интенсивно греться, и при достаточно высокой температуре контакт развалится на части. Эта идея вызвала замешательство технолога, который признал, что именно так происходит на практике из-за того, что рабочие борются за экономию дорогостоящего серебросодержащего припоя.

Его слова вывели из себя инженера-исследователя, чья лаборатория уже больше 10 лет исследовала причины перегрева и разрушения контактов, перепробовала множество вариантов конструкций, позволяющих избавиться от этого дефекта, не подозревая, что имеет дело с производственным браком. После установления причины брака был найден простейший способ навсегда избавиться от дефекта, обеспечив надежную пайку независимо от добросовестности оператора».

**Пример 145.** В цех привезли робота, собрали его, настроили и поставили к станку. Пожилой рабочий, много лет проработавший на этом станке, с удивлением наблюдал, как «железный человек» молниеносно выполняет все рабочие операции. Но уже через полчаса робот остановился. Теперь пришла очередь удивляться группе инженеров-электроников: что случилось? Все вроде бы в порядке... Оказалось, что в остановке виновата стружка, попавшая в движущиеся части станка. Рабочий бы смахнул ее щеткой, а для робота это совершенно непредусмотренная тупиковая ситуация. Инженеры почистили щеткой станок и снова включили, результат тот же – робот опять остановился. Как быть? Не ставить же рабочего со щеткой...

На радиозаводе в Англии после вспышки блицлампы фоторепортера сработали инфракрасные глаза-датчики робота-пожарного и весь запас пены был выплеснут на группу приглашенных гостей... Ложные срабатывания датчиков, внезапные неисправности в «мозгах» роботов – вот причины возникновения опасных для людей ситуаций.

### **5.8.2. Особенности задач синтеза**

Процесс создания любого ТО (продукции для заказчика, технологического процесса, средства технического оснащения) укрупненно можно представить состоящим из трех этапов, причем на каждом этапе решается ряд частных задач. Решение этих задач состоит из четырех типовых стадий.

Продуктом этапа проектирования является конструкторская документация; технологической подготовки производства – технологическая документация; этапа производства – изделие в металле (конечный продукт). На каждом этапе создания ТО и каждой стадии решения частных задач происходит процесс формирования качества разрабатываемого объекта. Наиболее сильное влияние на качество создаваемой продукции имеют первые этапы и начальные стадии решения каждой частной задачи.

Рассмотрим мероприятия, которые должны быть проведены для создания продукции высокого качества. Известно, что проблема возникает, когда имеется некоторая потребность, а средств или способов удовлетворения этой потребности нет. Тогда возникает предположение, что эту потребность можно удовлетворить созданием некоторого ТО – процесса или устройства. Этот ТО будет выполнять полезную функцию, которая и обеспечит удовлетворение возникшей потребности.

Анализ проблемы проводится с целью постановки и формулирования ряда задач, в которых конкретизируется, каким образом можно удовлетворить возникшую потребность, и формулируются требования к качеству конечного продукта. В соответствии с ИСО 8402 – это «выражение определенных потребностей или их перевод в набор количественно или качественно установленных требований к характеристикам объекта, чтобы дать возможность их реализации и проверки».

Первоначальная постановка задачи бывает нечеткой, в ней плохо может быть поставлена сама задача, которую нужно решить, в ней может содержаться ВПИ. Поэтому необходимо задачу, сформулированную в первоначальном виде, рассмотреть более широко, т. е. понять общую проблему, на фоне которой возникла задача.

Если по рассматриваемой проблеме имеется прототип, то можно провести его системный анализ, применяя морфологический подход. Морфологический подход следует начать с анализа функций, выполняемых ТО, и рассмотрения ФПД для выполнения ФО. Это позволит в какой-то степени избавиться от ВПИ, но при этом останется ориентировка на создание аналогичного технического устройства. Анализ

общей проблемной ситуации, на фоне которой сформулирована первоначальная частная задача, может привести к тому, что функцию, которую выполнял прототип, окажется целесообразным передать другому компоненту или в НС. Поэтому анализ проблемы целесообразно провести в два этапа. Сначала провести функциональный анализ проблемы в целом, а затем морфологический анализ прототипа.

*Анализ проблемы* выполняется для получения четких формулировок задач и определения ориентиров в поиске ресурсов для их решения.

*Анализ требований к качеству продукции.* В соответствии с ИСО 8402 продукция – это результат деятельности или процессов. Продукция может быть в двух видах: конкретном (ТО в металле, услуги) и в абстрактном (информация, модель, методика, комплект конструкторской или технологической документации и т. д.).

Продукция в абстрактном виде – это техническое решение, идея, оформленная в виде определенной модели, созданной на любом этапе разработки ТО при решении любой частной задачи.

Для *конечного потребителя* продукции показателями качества являются те, которые характеризуют функциональные свойства продукции, т. е. степень выполнения ГПФ, для которой предназначена эта продукция, например: производительность, мощность, точность выходных функциональных параметров и т. д.

Критерии качества продукции, получаемой на любом этапе ее создания (проектирование – производство), а также конечной продукции (товара) можно разделить на четыре группы.

*Функциональные* – характеризуют уровень выполнения техническим объектом ГПФ. От них зависит соответствие продукции требованиям рынка. К ним можно отнести:

- функциональные свойства ТО (точность отработки параметров, энергоемкость, герметичность и др.);
- пространственно-временные характеристики (габариты, время срабатывания, время переходного процесса и др.);
- надежность (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость);
- возможность диагностики работы при эксплуатации;
- безопасность, экологичность и др.

*Технологические* свойства связаны с возможностью обеспечения требуемого уровня качества и простотой изготовления (контролепри-



годность, цикл изготовления, возможность автоматизации производственных процессов и др.).

*Экономические* показатели определяют экономическую целесообразность (эффективность) реализации заданных функций создаваемым ТО (трудоемкость и стоимость изготовления, отсутствие дорогостоящих материалов и технологических процессов, эксплуатационные затраты).

*Антропологические* свойства связаны с влиянием человеческого фактора при производстве и эксплуатации ТО (влияние человека на технический объект и наоборот).

На этапе анализа проблемы критерии качества должны быть представлены с такой степенью обобщения, которая позволит сформулировать ИКР.

*Динамизация технических систем.* Ю. П. Саламатов в работе [17] дает следующую формулировку сущности динамизации ТС: «Жесткие системы для повышения их эффективности должны становиться динамичными, т. е. переходить к более гибкой, быстро меняющейся структуре и режиму работы, подстраиваемому под изменения внешней среды».

Он описывает проявление этой закономерности следующим образом: «С момента синтеза и на первых этапах развития ТС имеют обычно жесткие внутренние связи, и в них отсутствуют подсистемы для изменения режима работы в зависимости от изменения внешних условий. Из-за этого системы легко уязвимы, часто выходят из строя, недолговечны. Поэтому этап динамизации (адаптации) неизбежен. Для механических систем он начинается обычно с перехода от неподвижных частей к движущимся; жесткая связь (или конструкция) «ломается», и в этом месте вводится шарнир, жесткие элементы заменяются гибкими, гидро- и пневмоконструкциями; используется вибрация, периодическое изменение формы и др.»

*Динамизация веществ* начинается с разделения вещества на части и введения связи между ними. Здесь возможна такая последовательность переходов:

один шарнир → много шарниров → гибкое вещество → жидкость → газ → поле.

Динамичность – свойство, характеризующее структуру объекта, поэтому оно может проявляться как в компонентах, так и в связях между ними.

Переход на новый принцип действия, как правило, сопровождается повышением динамичности ТО, увеличением его функциональ-

ных возможностей. Например, применение металлического ключа для открывания дверей автомобиля заменяется посылкой кодированного радиосигнала. Этот же ключ используется и для блокировки системы зажигания.

История развития техники показывает, что связи во многих механизмах развивались в соответствии со схемой.

Однако здесь следует отметить некоторую особенность. С одной стороны, для гидравлической связи, как правило, используются специальные жидкости (естественное вещество – вода часто не удовлетворяет нужным свойствам), а в пневматической связи может использоваться воздух (специальные газы, как правило, не применяются). Поэтому пневматическая связь ближе к идеальному техническому решению.

С другой стороны, гидравлическая связь передает давление практически мгновенно, жидкость несжимаема, вследствие этого передача энергии происходит с минимальными потерями. В пневматических связях часть энергии расходуется на сжатие газа. Поэтому в соответствии с принципом энергетической проводимости гидравлическая связь лучше. Кроме того, она имеет и меньшее время переходного процесса, следовательно, она эффективнее с позиции управляемости процессом.

Принцип динамизации используется для совершенствования ТО в рамках определенного ФПД, поэтому можно сказать, что это один из приемов решения задач в процессе конструктивной эволюции ТО. Например, карданный узел в наборе торцевых гаечных ключей значительно упрощает выполнение работ в труднодоступных местах.

Следует отметить, что переход на другой ФПД, как правило, сопровождается увеличением степени динамичности ТС.

Динамизация ТО часто приводит к увеличению количества выполняемых функций, например, складной нож, раздвижной ключ.

Динамизацию поля во времени можно представить такой последовательностью:

постоянное → возрастающее (убывающее) → циклически меняющееся.

Периодические процессы могут быть импульсными и синусоидальными, а управление ими может осуществляться по амплитуде, частоте и сдвигу фаз сигнала.

Переменное поле, как правило, легче поддается преобразованиям, например, трансформатор переменного электрического тока. Оно имеет больше параметров, которые можно использовать для выработ-

ки управляющего сигнала. Импульсное управление, как правило, энергетически более экономно, чем управление постоянным сигналом.

**Переход с макроуровня на микроуровень.** Показателен пример развития пар трения:

- 1) подшипник скольжения;
- 2) подшипник качения (шариковые, роликовые);
- 3) гидростатические подшипники – вал не соприкасается с обоймой, а находится во взвешенном состоянии в масле, которое под давлением заполняет зазор. Получается бесконтактная гидростатическая опора;
- 4) газостатическая опора. Газ нагнетается под давлением через пористые втулки, которые являются его опорами;
- 5) гидродинамическая опора. Для быстроходных валов создается под действием центробежных сил;
- 6) магнитная опора – полевое взаимодействие.

Переход на другой ФПД приводит к скачкообразному качественному изменению техники. Например, для идентификации изделий вначале применялись печатные этикетки, затем штрих-коды, магнитные метки, радиометки (рис. 5.106).

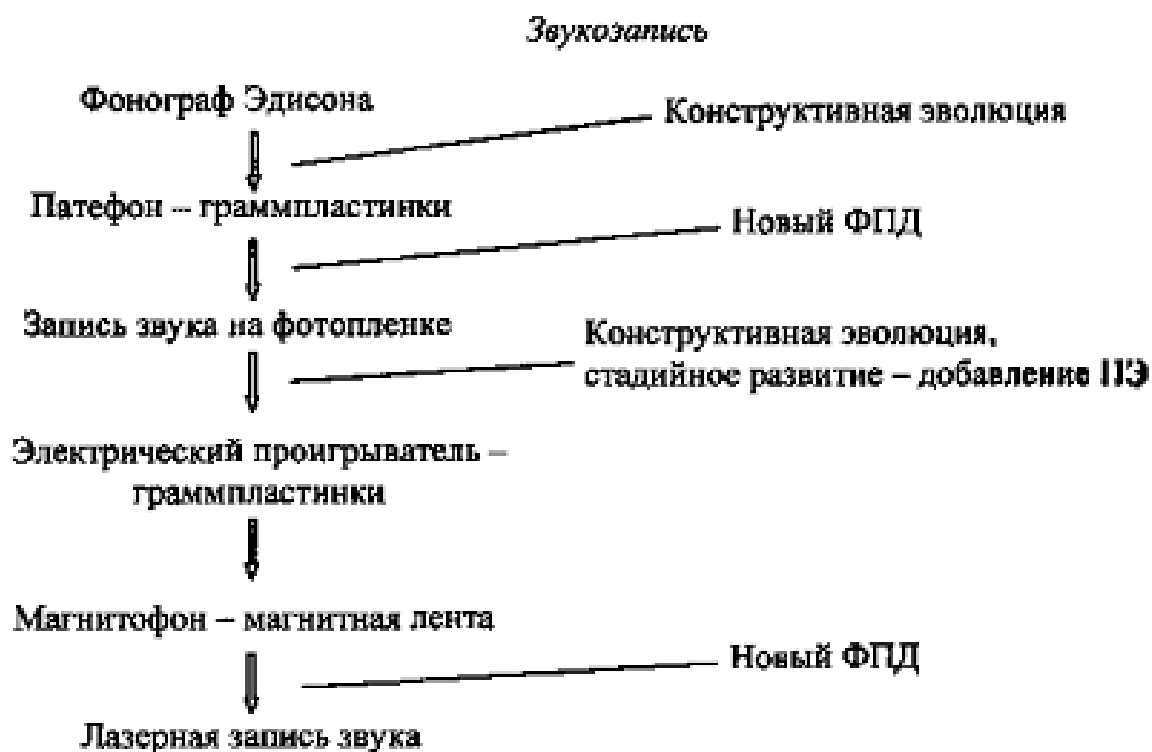


Рис. 5.106. Смена ФПД записи звука

В ТС все большее применение находят материалы со специальными свойствами, например, с эффектом памяти формы, изменяющие свой цвет в зависимости от температуры, фотохромные материалы – очки-хамелеоны и др.

Углеродные нанотрубки – аллотропная форма углерода (после графита и алмаза). Они представляют собой цилиндры, свернутые из одной или нескольких графитовых плоскостей толщиной в несколько атомов. В зависимости от размера и формы они обладают проводящими и полупроводниковыми свойствами. Нанодиоды и нанотранзисторы, изготовленные на их основе, в сотни раз меньше существующих транзисторов и диодов. На базе нанотрубок предложено изготавливать устройства памяти (нанопамять), наноинверторы, наномоторы. Разрабатываются новые материалы с наноструктурой или с нанорельефом, обладающие уникальными свойствами: самоочищением, износостойкостью, цветостойкостью и т. п.

## **5.9. Цели и методы инновационной деятельности**

Основная, стратегическая цель инновационной деятельности – обеспечение перевода экономики Беларуси на путь динамичного конкурентоспособного развития с главным акцентом на инновационное развитие предприятий и отраслей реального сектора, обеспечивающее повышение эффективности всего народного хозяйства и уровня жизни людей.

Методика осуществления инновационной деятельности включает следующие действия:

- проведение анализа и формирование прогноза направлений научно-технологического и инновационного развития экономики с учетом реальных условий рыночного спроса;
- развитие инфраструктуры инновационной системы;
- вовлечение в хозяйственный оборот результатов интеллектуальной деятельности;
- технологическое переоснащение производства для выпуска инновационной продукции;
- проведение экспертизы разработок, оказание консультационных, информационных, юридических или иных услуг по выводу инновационной продукции на рынок.

На предприятиях инновационная деятельность преследует различные цели и обусловлена факторами технического, финансово-

экономического, политического, ресурсного и рыночного характера. Инновационная деятельность может быть ответной реакцией на требования рынка, ограниченный доступ к передовым технологическим решениям, ресурсные ограничения, изменения в финансово-кредитной политике.

Учитывая взаимосвязанность целей инновационной деятельности и определяющих ее факторов, рассмотрим характер и содержание целей инноваций, осуществляемых на предприятиях. Они могут быть подразделены на стратегические и тактические цели.

В современных условиях стратегическими целями являются: выживание, увеличение прибыли, повышение конкурентоспособности, экспансий, завоевание новых рынков. В рыночной экономике цели максимизации прибыли и повышения конкурентоспособности продукции являются приоритетными.

Тактические (конкретные) цели инновационной деятельности достаточно многообразны. Основные из них: замена устаревшей продукции, расширение ассортимента продукции, сохранение традиционных рынков сбыта и их расширение, снижение материальных и энергетических затрат, улучшение качества продукции, снижение загрязнения окружающей среды, повышение гибкости производства. При этом тактические цели инновационной деятельности носят комплексный характер. Достижение этих стратегических и тактических целей во многом зависит от вышеуказанных факторов различного характера.

Эти факторы могут оказывать влияние на инновационную деятельность предприятий в комплексе и в различных комбинациях, что учитывается при принятии инновационных управленческих решений. Для предприятий внутренние комплексы инновационной деятельности являются первоочередными. Такими могут быть моральный и физический износ оборудования, устаревшая технология, необходимость снизить энергозатраты, стремление расширить производственные мощности. Для современных предприятий в управлении инновационной деятельностью важным является учет таких факторов, как инновационный климат в коллективе и восприимчивость его к нововведениям. На инновационную деятельность предприятий особое влияние оказывает их отраслевая принадлежность. Она в значительной мере создает привлекательность инноваций для частных, отечественных и иностранных инвесторов. При прочих условиях именно фактор отраслевой принадлежности повышает притягательность инвестиций. На предприятиях, где произошла смена собственника и их руководства, факторами инноваций стали институциональные перемены, т. е. смена формы контроля.

- Методы поддержки инновационной деятельности на предприятии:
- совершенствование системы управления инновационными процессами на предприятиях на основе принципов инновационного менеджмента, маркетинга, коммерциализации нововведений;
  - продолжение формирования и укрепления научно-технических центров на базе корпоративных структур как важнейшего сектора инновационной инфраструктуры;
  - укрепление материально-технической базы конструкторско-технологических подразделений промышленных предприятий, генерирующих инновационные процессы. Создание новых и опытных производств;
  - переход от внедрения научных разработок к их коммерциализации по заказу отраслей экономики в целях повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Сегодня главной научно-инновационной задачей является обеспечение динамичного развития технологически передовых отраслей производства. Больше внимания следует уделять разработке изделий и технологий. Доля новой, освоенной в течение последних нескольких лет в общем объеме производства продукции по отраслям промышленности, составила немногим более 10 %. Необходимо создавать благоприятные условия для развития высокоэффективных наукоемких технологий, технологического перевооружения и повышения инновационной активности предприятий, ускоренного обновления их основных фондов.

### ***5.9.1. Законодательство Республики Беларусь в области инноваций***

В Республике Беларусь разработана значительная законодательная база непосредственного государственного экономического участия в стимулировании инновационной деятельности предприятий: Законы «О научной деятельности», «О служебном изобретении», «О пресечении недобросовестной конкуренции», «Об инновационной деятельности», «О научно-технической информации», Указы Президента, положения «О белорусском инновационном фонде», «О порядке образования и использования средств инновационных фондов», «О порядке конкурсного отбора и реализации инновационных проектов, финансируемых из республиканского бюджета».

Одним из основных источников финансирования инновационной деятельности являются инновационные фонды министерств и ведомств. Законом Республики Беларусь «О бюджете Республики Бела-

рუსь» разрешено министерствам образовывать инновационные фонды за счет отчислений в размере до 0,25 % от себестоимости товаров (работ, услуг) подведомственных субъектов хозяйствования с отнесением начисленных средств на себестоимость и предоставляется право Совету Министров Республики Беларусь устанавливать, исходя из специфики работы, повышенные нормативы отчислений в инновационные фонды для отдельных министерств.

Постановление Совета Министров Республики Беларусь «О мерах по реализации Закона Республики Беларусь «О бюджете Республики Беларусь» № 267 установило для двадцати министерств повышающие нормативы отчислений в отраслевые инновационные фонды (нормативы отчислений увеличены от двух до восьмидесяти раз). Порядок формирования и использования фондов определяется постановлением Министерства экономики Республики Беларусь, Министерства финансов Республики Беларусь и Министерства по налогам и сборам Республики Беларусь «Об утверждении положения о порядке формирования и использования средств инновационных фондов» № 73/48/35.

Отличительной особенностью законодательных актов, регулирующих использование инновационных фондов, является определение доли инновационной составляющей в общем объеме расходов – 30 % (п. 2.6 постановления № 267 и п. 8.1 постановления № 73/48/35). Вышеназванные постановления предусматривают использование средств инновационного фонда по девяти направлениям, в том числе одно относится к инновационной деятельности, шесть – к инвестиционной, два направлены на решение социальных проблем.

Анализ Типовых положений о порядке образования и использования средств инновационных фондов показал, что государство сократило базовую величину норматива отчислений во внебюджетные инновационные фонды и одновременно увеличило количество и степень льготлируемых отраслей. Так, действующие нормативные акты позволяют дифференцировать нормативы отчислений, включенные в себестоимость продукции, от 0,25 до 20 %. Одновременно за последнее время увеличилось число направлений использования отраслевых инновационных фондов.

В последние годы правительством разработан пакет нормативных документов, стимулирующих привлечение иностранных инвестиций. По мнению Консультативного совета по иностранным инвестициям при Совете Министров Республики Беларусь, без иностранных

инвестиций экономика Беларуси полноценно развиваться не может. Существенное внимание уделяется законодательному обеспечению инвестиционного процесса. Так, в 2001 г. вступил в действие принципиально новый правовой акт – Инвестиционный кодекс, направленный на улучшение инвестиционного климата и установление прозрачности политики государства в области инвестиционной деятельности. В кодексе установлены ключевые для всех инвесторов гарантии прав собственности, гарантии защиты инвестиций от нецивилизованных изъятий, гарантии от причинения вреда со стороны государственных органов и их должностных лиц.

Для стимулирования притока зарубежного капитала в экономику Беларуси законодательством предусмотрена также система льготного инвестирования капитала. Так, при реализации продукции собственного производства коммерческая организация с иностранными инвестициями освобождается на три года от уплаты налога на прибыль, а при производстве особо важной продукции срок продлевается еще на три года. Товары, ввозимые иностранным учредителем в республику для формирования уставного фонда, освобождаются от таможенных пошлин и налога на добавленную стоимость.

Созданию благоприятного инвестиционного климата способствует принятая в 2002 г. Национальная программа привлечения инвестиций в экономику Республики Беларусь. В ней определены состояние инвестиционной сферы и задачи инвестиционной политики, механизмы стимулирования внутренних и привлечения внешних инвестиций, обоснована система мероприятий правового и организационно-экономического характера.

Вопросы, касающиеся прав на интеллектуальную собственность, регулируют Конституция Республики Беларусь (ст. 51), Закон Республики Беларусь «Об авторском праве и смежных правах» от 19.08.1998 г., семь законов Республики Беларусь по поводу правовой охраны и использования объектов промышленной собственности, ведомственные нормативные акты.

Разработаны новые проекты Патентного закона, Закона о фирменных наименованиях, Закона о противодействии монополистической деятельности и развитии конкуренции, включая раздел «О пресечении недобросовестной конкуренции». Все эти акты в совокупности с действующим в Республике Беларусь законодательством об интеллектуальной собственности составляют достаточную нормативно-правовую базу для охраны ее объектов.



### **5.9.2. Критерии инноваций**

Основные критерии инноваций:

Экономические: улучшенные показатели качества; более высокие экономические показатели; повышение эффективности использования ресурсов: трудовых, материальных, финансовых; конкурентоспособность; замещение импорта; рентабельность; вклад в крупные структурные сдвиги в экономике.

Научно-технические: новизна; наукоемкость; вклад в развитие научно-технического потенциала.

Экологические: вклад в экологическую безопасность; вклад в снижение выбросов вредных веществ в атмосферу, воду, землю; вклад в природовосстановительную деятельность.

Социальные: вклад в повышение благосостояния; вклад в решение важнейших проблем развития культуры, образования, медицины.

### **5.9.3. Организация инновационной деятельности**

*Организационные формы инновационной деятельности.*

Этапы инновационной деятельности на предприятии:

- поиск инноваций;
- систематизация и анализ;
- разработка инновационных проектов;
- технико-экономическое обоснование проекта;
- освоение инновационного проекта;
- управление инновационными проектами;
- оценка эффективности инноваций;
- инвестирование инновационной деятельности;
- государственная инновационная политика.

К числу основных организаций, реализующих инновационную деятельность, относятся:

Научные и инженерные организации: научно-исследовательские институты (НИИ), университеты, конструкторские бюро (КБ) и технологические бюро (ТБ). Конструкторские и технологические бюро могут быть самостоятельными учреждениями либо входить в состав НИИ или других подразделений.

Производственные и коммерческие организации: предприятия, концерны, тресты, финансово-промышленные группы, корпорации и др.

Специализированные малые инновационные организации: научно-технические фирмы, консультативно-экспертные фирмы, лизинговые фирмы, венчурные фирмы.

Лизинговая фирма приобретает для третьих лиц право собственности на имущество и отдает его в аренду на определенный срок.

Венчурная фирма (венчур) – самостоятельная малая наукоемкая фирма, занимающаяся инновационной деятельностью, которая учреждается авторами научно-технической идеи и венчурным предпринимателем (частным лицом или специализированной фирмой по производству венчурных предпринимательских услуг) с привлечением венчурного («рискового») капитала от внешних источников.

Как следует из определения фирмы-венчура, для ее создания необходимо наличие трех условий: идеи, научно-технического новшества, венчурного предпринимателя, готового на основе этой идеи организовать фирму, и венчурного капитала.

По своей сути венчурная фирма является самостоятельной лабораторией, занятой разработкой новшеств. В случае успешной деятельности фирма-венчур постепенно преобразуется в открытую или закрытую корпорацию, позволяющую ее учредителям получить крупный пакет акций. При этом доля прибылей авторов инновации обычно ниже, чем венчурных предпринимателей, которые, осуществляя управление фирмой, стремятся завладеть ее основной собственностью.

Инициатором венчурной фирмы чаще всего выступает небольшая группа лиц – талантливые инженеры, изобретатели, ученые, желающие заниматься разработкой перспективной идеи и при этом творить без ограничений, неизбежных в лабораториях крупных фирм, подчиненных в своей деятельности жестким программам и централизованным планам. Такой метод организации исследований позволяет максимально использовать потенциал научных кадров, освобождающихся в этом случае от влияния бюрократии. Специализированные инновационные комплексы: инновационные бизнес-инкубаторы, научно-технологические парки и технополисы.

*Бизнес-инкубаторы* – это организации, которые создаются на основе любой формы собственности и предоставляют начинающим свою деятельность субъектам малого предпринимательства на определенных условиях и на определенное время специально оборудованные под офисы и производство помещения в целях оказания этим субъектам помощи в постепенном налаживании и развитии своего бизнеса и приобретения финансовой самостоятельности.

Особенность инновационных инкубаторов заключается в том, что в них деятельность субъектов малого предпринимательства ориентируется на разработку и использование новшеств научно-технического характера.

Инкубаторы являются юридическими лицами. Своей основной задачей они ставят формирование благоприятной среды для развития и поддержки субъектов малого предпринимательства посредством создания организационно-экономических условий, стимулирующих их деятельность.

Бизнес-инкубаторы являются прообразами более сложных инновационных структур – научно-технологических парков.

*Научно-технологические парки* относятся к числу наиболее эффективных организационных форм инновационной деятельности. Главными задачами парковых структур являются: поддержка развития малых инновационных фирм, коммерциализация результатов научно-технических разработок, ускоренное продвижение инноваций в сферу материального производства, развитие новых идей в области инновационной деятельности.

Принято различать научные и технологические парки (технопарки). И те, и другие представляют собой объединения наукоемких фирм (или их подразделений), которые группируются вокруг крупных научных центров – при университетах или научно-исследовательских институтах (НИИ). Основное назначение научных парков – обеспечить органичную связь фундаментальных и прикладных исследований. Круг деятельности научных парков обычно ограничивается оказанием научных услуг, прежде всего, разработкой технических новшеств. В свою очередь, основное назначение технопарков – мобилизация материальных и трудовых ресурсов для освоения новых высокотехнологичных производств, создания и развития новых, технически сложных промышленных предприятий.

Технопарки служат для развития наукоемких технологий, наукоемких фирм. Это своеобразная фабрика по производству средних и малых рискованных инновационных предприятий. Одна из важнейших функций технопарков – непрерывное формирование нового бизнеса и его поддержка. Таким образом, технопарки являются основой развития венчурного бизнеса.

*Технополисы* – специализированные территориально замкнутые научно-производственные комплексы, в которых в единое целое собраны и научно-исследовательская деятельность, и наукоемкое производство, и подготовка научных, инженерных и рабочих кадров.

Одним из крупнейших технополисов является «Силиконовая долина», расположенная на западном побережье США. В конце XIX в. недалеко от Сан-Франциско владельцем железнодорожной компании Л. Стенфордом был основан университет. В 1940-е гг. на базе универ-

ситета был создан Стенфордский исследовательский институт, а в 1950-е гг. – первый научно-технологический парк. В 1960-е гг. на территории парка уже располагалось 25 высокотехнологичных фирм. В середине 1980-х гг. здесь стали функционировать еще 36 аналогичных парков, в которых размещались сотни различных фирм.

#### ***5.9.4. Этапы инновационной деятельности на предприятии***

Можно выделить следующие основные этапы инновационной деятельности на предприятии: поиск; систематизация и анализ; разработка инновационных технологий, проектов, решений; их освоение.

*Поиск инновации.* При поиске инновации существует проблема правильного выбора. Сложность отбора для внедрения в производство того или иного предлагаемого наукой и техникой решения заключается, прежде всего, в разнообразии возможного воздействия каждого из этих решений на производство.

*Разработка инновационных проектов. Техничко-экономическое обоснование проекта.* Разработка инновационного проекта – это научно-исследовательская работа прогнозно-аналитического и технико-экономического характера, главное содержание которой составляют: варианты реализации проекта, основные цели и ожидаемые результаты, конкурентоспособность и перспективность результатов проекта, его эффективность. В процессе разработки инновационного проекта выделяют следующие основные этапы: формирование инновационной идеи и постановка цели проекта, маркетинговые исследования идеи проекта, структуризация проекта, анализ риска и неопределенности, выбор варианта реализации проекта.

*Структуризация инновационного проекта.* Результатом структуризации проекта является перечень мероприятий (состав заданий, тем и работ), выполнение которых позволит обеспечить достижение в установленные сроки целевых значений проекта по каждому из вариантов его реализации.

*Анализ риска и неопределенности.* Одна из наиболее существенных особенностей инновационных проектов состоит в том, что выполнение проектов осуществляется в условиях риска и неопределенности. Под неопределенностью понимается неполнота или неточность информации об условиях реализации проекта, в том числе о связанных с ними затратах и результатах. Неопределенность, связанная с возможностью возникновения в ходе выполнения проекта неблаго-

приятных ситуаций и последствий, характеризуется понятием риска. Факторы риска и неопределенности подлежат учету в расчетах эффективности, если при разных возможных условиях реализации затраты и результаты по проекту различны. При оценке проектов наиболее существенными являются следующие виды неопределенности и инвестиционных рисков:

- риск, связанный с нестабильностью законодательства и текущей экономической ситуации, условий инвестирования и использования прибыли;

- внешнеэкономический риск (возможность введения ограничений на торговлю и поставки, наличие сильных конкурентов и т. п.);

- неполнота или неточность информации о динамике технико-экономических показателей, параметрах новой техники и технологии;

- колебания рыночной конъюнктуры цен, валютных курсов и т. п.;

- производственно-технологический риск (аварии, отказы оборудования, производственный брак и т. п.);

- неопределенность целей, интересов и поведения участников;

- неполнота или неточность информации о финансовом положении и деловой репутации организаций-участников (возможность неплатежей, банкротства, срывов договорных обязательств).

Результаты анализа рисков при разработке инновационного проекта выражаются в определении вероятности реализации различных его альтернативных вариантов.

*Технико-экономическое обоснование (ТЭО)* проекта – это подтверждение экономической целесообразности, необходимости и технической возможности материализации инновационной идеи в форму нового продукта.

Технико-экономическое обоснование включает в себя: 1) обоснование выбранной идеи из всех имеющихся идей по определенному критерию или системе критериев; 2) изучение и выбор рынка сбыта инновации; 3) обоснование времени выхода инновации на рынок; 4) расчет затрат на производство и реализацию инновации; 5) расчет эффективности производства и реализации инновации.

При поиске финансирования инновационной деятельности авторы инновационных проектов могут принимать участие в различных программах. Например, для участия в конкурсе научных проектов, поддерживаемых Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, требуется предоставление заявки на конкурс, аннотации проекта и обоснования проекта. Раздел «Обоснование проекта» должен содержать следующую информацию:

Тема.

Цель и задачи работы, ее актуальность.

Состояние разработки проблемы (дать характеристику результатов, полученных специалистами в данной области, указать научные центры, которые проводят подобные исследования, отметить нерешенные задачи, обосновать целесообразность).

Научная идея исследования (четко сформулировать, отметить уровень новизны).

Структура исследования (охарактеризовать методику исследования, изложить план совместных работ, выделить этапы исследований).

Ожидаемые результаты проекта, его научная и практическая значимость (отметить вид конечного результата: новая теория, новый метод, новый материал, новая технология, новое изделие и т. п., дать характеристику планируемых результатов исследования).

Возможные области использования результатов исследования.

– характеристика научного коллектива (сбалансированность по специальностям, опыт подобных исследований и т. п.);

– обеспеченность работы основным оборудованием, необходимым для ее выполнения;

– сведения об участии руководителя и основных исполнителей проекта в предыдущих конкурсах Фонда.

*Внедрение инновационного проекта.* Этап внедрения инновационного проекта в производство включает в себя подготовку производства, освоение новой продукции и производство новой продукции.

Подготовку производства можно разделить на:

– конструкторскую подготовку производства (КПП), целью которой является создание детализированной конструкции нового продукта;

– технологическую подготовку производства (ТПП), во время которой проектируется технология производственного процесса;

– организационную подготовку производства (ОПП), целью которой является планирование и организация нового производственного процесса.

Основной задачей КПП является создание комплекта чертежной документации для изготовления и испытания макетов, опытных образцов (опытной партии), установочной серии. Выделяют следующие стадии КПП: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочий проект.

Основной задачей ТПП является создание комплекта технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для производства новых изделий.

Этап освоения новой продукции предполагает проверку новой конструкции в опытном производстве и корректировку технической документации.

**Управление инновационными проектами.** *Управление содержанием.* В понятие «управление содержанием» («предметной областью») включаются следующие виды деятельности: 1) разработка концепции проекта; 2) определение предметной области; 3) выбор базовых проектных решений; 4) определение системы контроля предметной области; 5) проведение контроля и оценки результатов проекта. Эффективное управление содержанием предполагает обязательное участие в процессе профессионалов в предметной области знания. Первым документом, в результате которого реализуется данная функция, является бизнес-план проекта. Традиционно бизнес-план проекта содержит следующие основные позиции:

- резюме;
- анализ положения дел в отрасли;
- существо предлагаемого проекта;
- анализ рынка;
- план маркетинга;
- производственный план;
- организационный план;
- оценка рисков;
- финансовый план;
- приложения.

### **5.9.5. Оценка эффективности инноваций**

Все методы оценки эффективности инноваций можно разделить на статические и динамические.

К статическим методам относится расчет годового экономического эффекта от осуществления нововведений, проводимый с использованием следующих показателей:

1. Годовой экономический эффект от применения новых технологических процессов, механизации и автоматизации производства, способов организации производства и труда, обеспечивающих экономию производственных ресурсов при выпуске одной и той же продукции.

2. Годовой экономический эффект от производства и использования новых средств труда (машины, оборудование, приборы и т. п.) с улучшенными качественными характеристиками (производительность, долговечность, издержки эксплуатации и т. д.).

3. Годовой экономический эффект от производства и использования новых или усовершенствованных предметов труда (материалы, сырье, топливо).

4. Годовой экономический эффект от производства и использования новой техники, применяемой в нескольких сферах потребления.

5. Годовой экономический эффект от производства новой продукции или продукции повышенного качества.

Методика определения статических показателей эффективности инновационных проектов длительное время являлась доминирующей, однако у нее есть недостатки:

1. Неучтенность фактора времени.

2. Неучтенность специфики инновационных процессов, в частности их рискованности.

3. Предположение об обязательном наличии базы сравнения.

4. Использование в расчетах нормативного коэффициента эффективности капиталовложений, применение которого крайне затруднительно в современных условиях.

Динамические методы оценки эффективности инвестиций базируются на теории временной стоимости денег. Временная ценность денег обусловлена, с одной стороны, инфляцией, а с другой – платностью за капитал, т. е. тем, что некоторая сумма средств, авансированная в форме капитала, по истечении некоторого времени приносит своему владельцу доход в виде ренты. Динамические методы являются основой расчета экономического эффекта различного рода долгосрочных проектов, связанных с движением финансовых средств.

К числу основных динамических показателей относятся:

1. *Чистая дисконтированная стоимость* (ЧДС или МРУ). *Дисконтированием* называется процесс определения текущей величины будущих потенциальных объемов денежных средств.

2. *Внутренняя норма рентабельности* (1КК). Данный показатель характеризует значение ставки дисконтирования, при котором проект остается прибыльным.

3. *Динамическая рентабельность*. Данный показатель характеризует уровень превышения доходов от проекта над его расходами, т. е. уровень рентабельности проекта, скорректированный с учетом временной стоимости денежных средств.

4. *Динамический срок окупаемости* – это показатель, характеризующий период времени, в течение которого окупаются все расходы по проекту.



### **5.9.6. Инвестирование инновационной деятельности**

Существуют следующие основные формы финансирования инновационной деятельности:

*Государственное финансирование.* Мировой опыт в данной сфере демонстрирует большое разнообразие используемых подходов. Так, экономическая политика, проводимая США и странами Западной Европы, опирается на достаточно высокий уровень государственного участия в финансировании процессов прикладных разработок и процессов обновления основного капитала стратегически важных технологических областей. С другой стороны, технологическая политика, реализуемая Японией, предполагает минимальное прямое государственное участие в финансировании промышленных ЕИОКР и опирается на систему значимых стимулов, способствующих эффективному привлечению в данную область частных инвестиций. Однако эффективное использование японской модели требует наличия целого ряда специфических условий (в частности, высочайшей степени доверия частных финансовых институтов к проводимой правительством экономической политике; высокой степени национальной демографической однородности; высокой степени экспортной ориентированности практически всех предприятий национальной экономики; наличия долгих традиций успешного использования технологических факторов в реализации стратегий получения конкурентных преимуществ и т. д.). В этой связи очевидно, что в ближайшей перспективе более значимым для построения оптимальной отечественной макроинвестиционной политики является опыт европейских государств и США.

Одним из ключевых направлений реализации государственной инвестиционной политики в инновационной сфере в экономически передовых странах мира традиционно выступает размещение на рынках новой научно-технической продукции государственных заказов. Стабильное функционирование подобных систем обеспечивается совокупностью достаточно детально проработанных законодательных актов, вследствие чего рынки государственных заказов в развитых странах являются весьма емкими и привлекательными для широкого круга промышленных корпораций.

Наиболее широкое развитие и наиболее детальную законодательную и инфраструктурную проработку политика государственных закупок научно-технической продукции получила в США. Поэтому представляется, что рассмотрение основных особенностей зарубеж-

ного опыта в области подобной политики может быть наиболее продуктивно осуществлено на примере именно этой страны.

Одним из основополагающих условий реализации государственных заказов во всех странах мира выступает конкурсный отбор организаций-подрядчиков. В США контракты на проведение ЕИОКР и разработку новых технологий неизменно размещаются на рынках в рамках системы «конкурентных торгов». Первый этап торгов предусматривает проведение многоступенчатой конкуренции проектов, где корпорации-подрядчики (участники торгов) предоставляют свои проекты (заявки) в «запечатанном», т. е. не разглашаемом конкурентам виде. В то же время современное федеральное законодательство США для обеспечения высокой степени конкуренции на подобных торгах и выбора наиболее надежных подрядчиков-исполнителей заказов предусматривает широкие масштабы гласности о торгах и публикации в открытой печати условий самого контракта, его основных технических сторон, причем даже в случаях, если контракт имеет оборонное значение. В торгах могут участвовать все фирмы, имеющие право операций на государственном рынке (для этого они должны отвечать широкому перечню требований федеральных ведомств). В силу высокой значимости государственных заказов для промышленных корпораций, число участников торгов достигает весьма высокого уровня (в некоторых случаях – до 60 претендентов на один контракт.).

Поскольку на государственном рынке вокруг государственных заказов на высокие технологии во многих случаях складывается неценовая конкуренция, то минимальная цена предлагаемого решения на практике далеко не всегда оказывается решающим фактором выбора фирмы-подрядчика. Главным фактором, как показывает хозяйственная практика США, в конечном счете, оказываются качественные характеристики предлагаемой разработки, степень их превосходства над параметрами альтернативных проектов, а главное – возможность создания «технологического задела» – т. е. возможность ускорить темпы технического прогресса и получить возможность «отрыва» во времени от ныне существующих технологических подходов к решению аналогичных проблем.

Окончательное решение о выборе корпорации-подрядчика и выдаче ему заказа на практике осуществляется специальными экспертными комиссиями – независимыми научными комитетами военных или гражданских ведомств, не подчиненными в своей деятельности никаким органам исполнительной власти. Федеральное законодатель-

ство придает особое значение вопросам обеспечения реальной независимости данных органов и тщательно защищает их от давления заинтересованных лиц и организаций.

Одним из основополагающих принципов реализации государственных заказов в научно-технической сфере является принцип «долгосрочного контрактирования», заключающийся в том, что выбранной по конкурсу компании-реализатору проекта выдается долгосрочный контракт на выполнение всей программы разработок, начиная от зарождения идеи и до ее воплощения в виде конечного продукта, т. е. до создания опытного образца или выпуска промышленной серии. Длительность таких контрактов составляет, как правило, пять–восемь лет. После присуждения выбранному подрядчику контракта на крупную сумму и передачи ему всей научно-технической, предпроектной документации одновременно ведомства-заказчики нередко создают или искусственно поддерживают потенциальный фронт конкурентов: корпораций-подрядчиков-дублеров, которые могут быстро получить право участвовать в осуществлении заказа на всех последующих стадиях в случае срыва или ненадлежащего его выполнения основным подрядчиком.

В аналогичной форме в США осуществляется и размещение-торги федеральных контрактов на НИОКР среди «бесприбыльных организаций» – университетов и колледжей – в рамках заключенных между ними и федеральными ведомствами (Национальным научным фондом, Министерством обороны, Министерством энергетики и т. д.) долгосрочных федеральных «Генеральных соглашений». Государство в лице своих ведомств, при выполнении своих заказов, заранее оговаривает за собой право на «сквозной» финансовый, экономический, правовой, промышленный, научно-технический, санитарный и трудовой контроль за всей хозяйственной деятельностью корпорации-исполнителя. Государственный контроль, государственно-техническая инспекция, государственно-финансовый и бухгалтерский контроль обязательны на всех этапах выполнения федерального контракта.

Методы государственного участия в финансировании инновационной деятельности могут быть не только прямыми, но и косвенными. К числу косвенных инструментов государственной инвестиционной политики принято относить:

– совершенствование налоговой системы с целью создания выгодных условий для ведения инвестиционной деятельности в инновационной сфере всеми субъектами независимо от форм собственности и видов финансирования;

– развитие системы государственных гарантий финансовым институтам, способным выступать в роли инвесторов процессов технологического развития независимо от их страновой принадлежности;

– совершенствование нормативной базы, регламентирующей отношения межфирменной кооперации в научно-технической сфере и регулирующей процессы формирования и использования воспроизводственных фондов предприятий;

– содействие развитию альтернативных систем инвестирования научно-технической и инновационной деятельности предприятий и организаций (в частности, систем венчурного финансирования, лизинговых операций) и т. д.

*Иностранное инвестирование.* Инновационная деятельность часто для своего эффективного развития требует больших объемов инвестиционного капитала, которых невозможно авансировать только за счет внутренних источников. Поэтому важную роль в функционировании общей системы инвестирования инновационной деятельности играют иностранные инвестиции. Вопросы их привлечения являются достаточно неоднозначными, прежде всего по той причине, что эта область является главным источником национальной конкурентоспособности и потому требует первоочередного учета национальных интересов. Очевидно, что всякие внешние инвестиции имеют целью окупаемость и потому в долгосрочной перспективе неизбежно предполагают превышение оттока капитала из инвестируемой области над его притоком в нее. На отдельных этапах общеэкономического развития такие издержки допустимы и зачастую неизбежны, но подобная политика является оправданной лишь в тех случаях, когда она позволяет национальной экономике как системе существенно повысить свой технико-технологический потенциал и получить реальные возможности обеспечения собственной конкурентоспособности. Как отмечают исследователи, привлечение зарубежных инвестиций в сферу высоких технологий имеет смысл лишь для осуществления масштабной модернизации существующих и организации новых технологически прогрессивных производств. При этом следует учитывать, что привлечение эффективных (предполагающих реальное финансирование процессов технологического развития отечественных предприятий) иностранных инвестиций в денежной форме может быть продуктивно осуществлено лишь на макроэкономическом уровне, поскольку децентрализованно такие инвестиции привлечь невозможно. Финансовые инвестиционные ресурсы для целей долгосрочного технологического развития отечественных производств должно привле-

касть государство путем эмиссии правительственных ценных бумаг и укрепления доверия к ним на международном рынке. По такому пути идут все развитые страны мира. Говоря о привлечении иностранных инвестиций в технологическое развитие на микроуровне, специалистами подчеркивается, что такого рода инвестиции должны привлекаться отечественными предприятиями прежде всего в овеществленной форме, т. е. в форме наукоемких технологических комплексов. Механизмы реализации подобных процессов различны и включают в себя формы и методы установления межфирменной кооперации в научно-технической сфере.

*Венчурное финансирование.* Главные отличия венчурного финансирования от традиционного состоят: а) в низкой вероятности возврата вложенных средств (40–70 %) и б) в высокой доходности в случае достижения коммерческого успеха (в два раза выше, чем в традиционных сегментах рынка). То есть, в отличие от системы коммерческого кредитования, для предоставления финансовых средств гарантии фирмы не имеют решающего значения (поскольку возможность неудачного исхода проекта допустима). Гораздо более важным условием выступает наличие реального привлекательного предпринимательского замысла.

Аккумуляция и вложения денежных средств инвесторов в конкретные инновационные проекты осуществляются специальными венчурными фондами. Несмотря на кризисы, циклически возникающие на рынке венчурного капитала, за последнее время он превратился в важнейший элемент инновационного развития с устойчивым трендом роста. Так, в США в 90-е гг. прошлого века венчурные инвестиции в инновационную экономику выросли в 30 раз и составили 100 млрд долл. США.

Формы венчурных вложений могут быть следующими: стартовые инвестиции, финансирование развития предприятия, финансирование конкретных операций, прочие венчурные вложения.

Венчурное инвестирование производится специально созданными венчурными фондами, которыми руководят управляющие компании. Такие фонды могут быть независимыми, либо принадлежать определенным финансовым институтам (корпоративные венчурные фонды).

Потенциальными инвесторами инновационной венчурной деятельности в условиях развитого рынка являются промышленные корпорации, финансово-промышленные группы, банки, инвестиционные компании.

*Воспроизводственные фонды.* В общей структуре источников финансирования инновационной деятельности предприятий особую роль играет совокупность воспроизводственных фондов. В целом можно выделить три наиболее значимые укрупненные составляющие указанной совокупности: (1) амортизационные фонды предприятий; (2) фонды накопления, формируемые из чистой прибыли предприятий; (3) инновационные фонды.

Среди перечисленных типов воспроизводственных фондов первостепенную роль в финансировании процессов экономического развития, несомненно, играют амортизационные фонды предприятий. В развитых странах доля амортизационных отчислений в общем объеме капитальных вложений промышленных предприятий очень велика и демонстрирует неизменную тенденцию к росту. Так, в США она выросла с 50–58 % в 60-е гг. до 70–76 % в настоящее время, в Германии – с 30–37 до 55–60 %, в Японии – с 32–35 до 45–50 %. Подобные оценки однозначным образом свидетельствуют о том, что формирование рациональной амортизационной политики, позволяющей предприятиям эффективно формировать и использовать внутренние источники финансирования капитальных вложений, на сегодняшний момент выступает одной из наиболее приоритетных задач общей инвестиционной политики.

*Эмиссия корпоративных ценных бумаг.* Преимущества эмиссии корпоративных ценных бумаг как способа привлечения инвестиционных ресурсов в развитие бизнеса состоит в возможности достаточно быстро авансировать большие объемы капитала и достаточно автономно гибко им распоряжаться. К числу основных типов корпоративных ценных бумаг, используемых для описываемых целей, принято относить акции и облигации.

*Акции* представляют собой долевые ценные бумаги, закрепляющие права владельцев (акционеров) на получение части прибыли финансируемой компании в виде дивидендов или части имущества этой компании в случае ее ликвидации, а также устанавливающие для своих владельцев определенный круг прав по участию в управлении финансируемой компанией.

*Облигации* – это ценные бумаги, выпускаемые организациями, подтверждающие факт ссуды денежных средств инвестора данным компаниям-эмитентам и дающие право на участие в прибыли эмитента особо оговоренным способом.

*Лизинг* как бизнес-технология представляет собой предоставление на условиях аренды средств производства заинтересованным

предприятиям на определенный период. По договору лизинга (финансовой аренды) арендодатель обязуется приобрести в собственность указанное арендатором имущество у определенного им продавца и предоставить арендатору это имущество за плату во временное владение и пользование для предпринимательских целей. При этом арендодатель не несет ответственности за выбор арендатором (лизингополучателем) предмета аренды и продавца. Традиционно предметами лизинговых соглашений выступают различные виды оборудования, транспортных средств, строения, лицензии, ноу-хау, программные средства и т. д.

Базовой отличительной особенностью лизинга как способа инвестирования научно-технической деятельности выступает тот момент, что лизинг позволяет получать доступ к дорогостоящим исследовательским и производственным фондам даже в условиях резкой ограниченности собственных средств организации. Зародившийся в США в начале 50-х гг. 20 в. лизинг как специфическая форма финансовой аренды быстро получил распространение в мировой хозяйственной практике, что было обусловлено рядом его принципиальных преимуществ перед традиционными формами финансирования процессов создания и модернизации предприятий. Согласно имеющимся оценкам суммарная стоимость лизинговых операций в промышленно развитых странах составляет около 30 % общего объема инвестиций. Ежегодный мировой объем лизинговых договоров в конце 90-х гг. 20 в. составлял около 432 млрд долл., при среднегодовых темпах роста в 8,6 %. В Российской Федерации сейчас около 80 % всего объема новой конкурентоспособной продукции производится на оборудовании, взятом в лизинг.

*Государственная инновационная политика.* Главная цель государственной инновационной политики – создание экономико-правовых, финансовых, организационных и других условий, обеспечивающих ускоренную разработку и освоение новой конкурентоспособной продукции и современных экологически чистых, безопасных, ресурсосберегающих технологий и на их основе – структурную перестройку и развитие экономики Республики Беларусь.

Можно сформулировать основные принципы и направления государственной инновационной политики:

- а) признание модели инновационного развития в качестве приоритетной;
- б) максимальное использование рыночных механизмов активизации инновационной деятельности и предпринимательства;

в) ориентация инновационной деятельности на социально-экономические и научно-технические приоритеты с целью насыщения внутреннего рынка, импортозамещения и выхода на новые ниши в мировом рынке;

г) поощрение отечественных и зарубежных инвестиций в инновационные проекты, обеспечивающие расширение производства конкурентоспособной продукции, проведение гибкой таможенной политики;

д) активная роль государства в создании экономико-правовых условий и рыночных механизмов, обеспечивающих превращение инноваций в главный фактор социально-экономического развития общества.

В соответствии с Концепцией социально-экономического развития Республики Беларусь до 2015 г. системная модель национальной экономики рыночного типа в качестве одной из своих доминант предусматривает переход на инновационный ресурсосберегающий тип воспроизводства с интенсивным внедрением новых и высоких технологий информационного общества.

Важное направление государственной инвестиционной политики – привлечение иностранного капитала в условиях недостатка внутренних инвестиций, незначительного капитала банков, ограниченных собственных средств предприятий. Прежде всего ожидаются инвестиции в нефтехимическую, деревообрабатывающую и пищевую отрасли, машиностроение, приборостроение, сферу связи, туризм.

В настоящее время зарегистрировано более 2700 предприятий, созданных с участием инвесторов более чем из 80 стран мира. Российские инвесторы участвуют в деятельности 430 совместных и иностранных предприятий на территории Беларуси. Основной объем инвестиций в уставные фонды совместных и иностранных предприятий поступает из США – около 19 %, Германии и Нидерландов – по 17 %, Великобритании и Кипра – по 8 %. Кроме отраслей промышленности (деревообрабатывающая, пищевая, химическая, машиностроение, металлообработка), инвесторов привлекают торговля и общественное питание.

В Республике Беларусь существует несколько способов участия иностранных инвесторов в приватизационном процессе. На стадии разгосударствления и приватизации конкретного государственного предприятия инвестор может участвовать в создании открытого акционерного общества путем внесения в его уставный фонд денежного или имущественного взноса в размере не менее 20 тыс. долл. США. Участие иностранных инвесторов связано также с выкупом принадлежащих государству акций.



Одной из основных функций государственной инновационной политики является формирование инновационной инфраструктуры, которая представляет собой механизм государственной поддержки инновационного предпринимательства и является базовой составляющей национальной инновационной системы.

Главные задачи, которые решаются с помощью инновационной инфраструктуры, состоят в следующем:

1. Организация и материально-финансовая поддержка малых инновационных предприятий. Обучение инновационному предпринимательству.

2. Венчурное финансирование и страхование инновационных проектов.

3. Информационное и телекоммуникационное обеспечение участников инновационного процесса.

4. Аутсорсинговое сервисное сопровождение научной, производственной и внедренческой деятельности.

Если создание основных субъектов инновационной инфраструктуры является прерогативой государства, то образование фирм и компаний, специализирующихся в сфере инновационного сервиса, происходит чисто рыночными методами. Их наличие на рынке труда определяется только спросом со стороны хозяйствующих субъектов и поэтому не требует организационного вмешательства со стороны государства.

В сложившихся условиях правительства разных стран поддерживают создание и деятельность крупных интегрированных производств, так как интеграция отдельных фирм становится необходимым средством для приобретения новых технологий, реализации накопленных знаний и опыта при производстве и совершенствовании продукции, освоении зарубежных рынков.

Одним из важнейших направлений государственного стимулирования инновационной активности является рациональная налоговая политика. Используя опыт экспериментов в области налогообложения многих стран, Министерство промышленности Швеции разработало модель, позволяющую оптимизировать размер налогообложения прибыли. Согласно этой модели изъятие прибыли в виде налога до 25 % ее величины не оказывает влияния на инновационную активность фирм. Начиная с 25 %, склонность к нововведениям резко падает, а после 50 % фирма не участвует в инновационном процессе вовсе. В Республике Беларусь разработаны налоговые льготы для разработ-

чика научно-технической продукции. Однако как только предприятие начинает выпуск наукоемкой продукции, уровень налогообложения резко возрастает. По мнению экспертов, повышение стимулирующей роли налогообложения в инновационной сфере требует дальнейшего развития налогового законодательства.

Эффективность государственной инновационной политики во многом зависит от выделения (таргетирования) приоритетных инновационных направлений.

В США процесс таргетирования приоритетных направлений развития состоит из следующих этапов: 1) политическое решение на высшем уровне; 2) экономическая формулировка поставленных политических задач; 3) разработка научно-технического обеспечения.

В Японии отбор приоритетных направлений осуществляется на основе учета двух аспектов: а) долгосрочных прогнозов научно-технического развития; б) приоритетных текущих проблем.

По мнению экспертов, ключевыми технологическими направлениями, способными выступать в качестве источников получения стратегических конкурентных преимуществ в начале XXI в., являются:

- микроэлектроника;
- микромеханика (сенсорные устройства, микроприборы, микродвигатели);
- биотехнологии и генетика (фармакология, защита растений, повышение урожайности);
- «биокомпьютеры»;
- сверхпроводимость;
- методы эффективного получения, сохранения и создания запасов энергии;
- волоконная оптика и ее использование в компьютерных сетях, многоканальной видеосвязи;
- новые материалы;
- оптикоэлектроника (лазеры);
- технологии переработки отходов.

## Литература

1. Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск : Выш. шк., 1985. – 286 с.
2. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 432 с.
3. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.
4. Турпаев, А. П. Винтовые механизмы и передачи / А. П. Турпаев. – М. : Машиностроение, 1982. – 223 с.
5. Металлорежущие станки и автоматы / А. С. Проников [и др.] ; под ред. А. С. Проникова. – М. : Машиностроение, 1981. – 479 с.
6. Сухарев, И. П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности / И. П. Сухарев. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с.
7. Прушак, В. Я. Технология древесно-полимерных композитов для деталей машин / В. Я. Прушак, С. Н. Колдаева, М. И. Михайлов ; под ред. П. В. Сыроева. – Гомель : Информтрибо, 1992. – 255 с.
8. Бьюзен, Т. 10 способов как стать гением / Т. Бьюзен ; пер. с англ. А. Прокопчук. – М. : Изд-во АСТ, 2002. – 228 с.
9. Ревенков, А. В. Теория и практика решения технических задач : учеб. пособие / А. В. Ревенков, Е. В. Ревенкова. – М. : ФОРУМ, 2008. – 384 с.
10. Половинкин, А. И. Основы инженерного творчества / А. И. Половинкин. – М. : Машиностроение, 1998. – 368 с.
11. Ракитов, А. И. Курс лекций по логике науки / А. И. Ракитов. – М. : Высш. шк., 1971. – 228 с.
12. Лакофф, Дж. Метафоры, которыми мы живем / Дж. Лакофф, М. Джонсон ; пер. с англ. ; под ред. А. Н. Баранова. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 452 с.
13. Шрагина, Л. И. Конструирование метафор в контексте психологии способностей / Л. И. Шрагина // Психол. журн. – 1999. – № 1. – С. 123–127.
14. Физические эффекты в машиностроении : справочник / В. А. Лукьянец [и др.] ; под общ. ред. В. А. Лукьянца. – М. : Машиностроение, 1993. – 228 с.

15. Иванов, И. И. Формулы творчества, или как научиться изобретать / И. И. Иванов. – М. : Просвещение, 1994. – 218 с.
16. Митрофанов, В. В. От технологического брака до научного открытия / В. В. Митрофанов. – Ассоциация ТРИЗ Санкт-Петербурга, 1998. – 123 с.
17. Саламатов, Ю. П. Как стать изобретателем / Ю. П. Саламатов. – М. : Просвещение, 1990. – 236 с.
18. Основы научных исследований / В. И. Крутов [и др.] ; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М. : Высш. шк., 1989. – 400 с.
19. Герасимович, А. И. Математическая статистика / А. И. Герасимович, Л. И. Матвеева. – Минск : Выш. шк., 1987. – 200 с.
20. Поиск новых идей: от озарения к технологии. Теория и практика решения изобретательских задач / Г. С. Альтшуллер [и др.]. – Кишинев : Карта молдовенска, 1989. – 630 с.
21. Альтшуллер, Г. С. Найти идею: Введение в теорию решения изобретательских задач / Г. С. Альтшуллер. – Новосибирск : Наука, Сибир. отд-ние, 1991. – 223 с.
22. Соломин, И. С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И. С. Соломин. – М. : Машиностроение, 1972. – 215 с.
23. Дунин-Барковский, И. В. Измерение и анализ шероховатости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М. : Машиностроение, 1978. – 230 с.
24. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений / С. Г. Рабинович. – Л. : Энергия, 1978. – 261 с.
25. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
26. Экспериментальные методы исследований деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин [и др.]. – Киев : Навук. думка, 1981. – 584 с.
27. Быков, В. П. Методика проектирования объектов новой техники : учеб. пособие / В. П. Быков. – М. : Высш. шк., 1990. – 115 с.
28. Джонс, Дж. К. Методы проектирования : пер. с англ. / Дж. К. Джонс. – 2-е изд. – М. : Мир, 1986. – 326 с.
29. Мюллер, И. Эвристические методы в инженерных разработках : пер. с нем. / И. Мюллер. – М. : Радио и связь, 1984. – 144 с.
30. Таленс, Я. Ф. Работа конструктора / Я. Ф. Таленс. – Л. : Машиностроение, 1997. – 307 с.
31. Чус, А. В. Основы технического творчества : учеб. пособие / А. В. Чус, В. А. Данченко. – Киев–Донецк : Вища шк., 1983. – 184 с.

32. Прахов, Б. Г. Изобретательство и патентоведение. Словарь-справочник / Б. Г. Прахов. – Киев : Вища шк., 1987. – 180 с.

33. Михайлов, М. И. Исследования и изобретательство в машиностроении : пособие по одной дисциплине для студентов специальности 1-36 01 03 / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 61 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Логические операции с понятиями

Для уменьшения содержания исходного понятия нужно исключить некоторые признаки. Примером обобщения понятия является переход от понятия «ракетный двигатель на жидком топливе» к понятию «ракетный двигатель», а затем к понятию «реактивный двигатель» и, наконец, «двигатель».

*Ограничение* понятия представляет собой операцию обратную обобщению. Для ограничения исходного понятия необходимо включить дополнительные признаки. Это приведет к увеличению содержания понятия и уменьшению его объема. При этом новое ограниченное понятие будет иметь все признаки исходного понятия и новый введенный признак. Например, энергия – кинетическая энергия – кинетическая энергия поступательно движущегося тела.

Различают два вида логического деления: по *виду изменения признака* и *дихотомическое*.

Например, людей можно разделить по различным признакам: по возрасту, уровню образования, признакам пола, социальному положению и т. д.

При анализе различных объектов используется еще одна операция деления, которая, в отличие от логического деления понятия, именуется *декомпозицией*. Это деление объекта на составные части. Например, можно мысленно разделить кресло на составные части: сиденье, спинка, ножки, подлокотники.

Декомпозицию выполняют таким образом, чтобы не было перекрещивающихся понятий и чтобы члены деления (составные части) в сумме составляли бы делимое понятие, т. е. должны быть перечислены все части объекта.

Целью классификации является систематизация знаний. Она позволяет создать развернутую систему об исследуемом объекте, в которой каждый представитель делится на новые члены, разветвляясь на множество классов.

Всякая классификация относительна. Во-первых, потому, что каждая разрабатывается с определенной целью. Во-вторых, с развитием науки и техники, как правило, изменяются и классификации. Поэтому ни к одной из них нельзя подходить как завершенной и абсолютной.

**Отдельные составляющие категорических высказываний**

*Атрибутивным* (от лат. *attributis* – свойство, признак) называется высказывание о признаке предмета.

Высказывание о связи предмета и его признака включает следующие составляющие:

- субъект высказывания (*S*) – понятие о субъекте высказывания;
- предикат (лат. *praedicatum* – сказуемое) высказывания (*P*) – понятие о признаке предмета, рассматриваемого в высказывании; связка, выражаемая словами: есть, суть, является или группой слов, или тире, или простым согласованием слов. Обозначим ее знаком «—»;
- квантор (лат. *quantum* – сколько) – указывает, относится ли высказывание ко всему объему понятия, выражающего субъект, или к его части; кванторные слова: все, ни один, некоторые (обозначим его *q*).

Структура атрибутивного высказывания имеет вид:  $qS - P$ .

Атрибутивные высказывания позволяют описывать включение (или исключение) единичного понятия в объем родового, или включать (исключать) вид в род, например: некоторые стали упрочняются термообработкой; все топливные баки ракеты герметичны; ни один металл не является диэлектриком.

**Модальные суждения.** Из категорического высказывания можно составить модальное суждение, например: «Возможно, что все станки исправны».

Из всех видов модальностей рассмотрим только три вида: логические, физические и нормативные, которые имеют непосредственное отношение к решению различных задач.

*Логические модальные суждения* описываются в терминах: логически необходимо, случайно, возможно (невозможно).

Логически необходимое суждение – такое суждение, отрицание которого представляет собой логическое противоречие.

*Логическая возможность* – внутренняя непротиворечивость высказывания. Логически возможно все, что не противоречит законам логики. Например, если истинно высказывание, что «Некоторые станки – исправны», истинным может быть высказывание «Некоторые станки – не исправны». Это не будет противоречить первому утверждению.

Логически невозможно то, что противоречит законам логики. Логически невозможно, чтобы были истинными, например, два таких утверждения: «материал электропроводный» и «материал не электропроводный».

Физически необходимо то, отрицание чего нарушает законы природы. Например, физически необходимо, что при замерзании воды увеличивается ее объем. Это объективное свойство воды.

Физически возможным является высказывание, которое не противоречит законам природы. Например, физически можно организовать колебательный процесс таким образом, чтобы колебания были незатухающими. Это не противоречит законам природы.

*Нормативная необходимость* – это обязанность, в ней часто употребляется слово «должен». Например, «Прибор должен обеспечивать погрешности измерения не более 10 %».

*Нормативная возможность* – это то, что разрешено. Например, допускается увеличение погрешности измерения при повышении температуры свыше 50 °С.

*Нормативная запрещенность* – например, не допускается эксплуатация прибора при низких температурах.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Типовые операции мышления

**Индукция и дедукция.** *Дедукция* (лат. *deductio* – выведение) – умозаключение, в котором связь между посылками и следствием опирается на логические правила. Поэтому заключение с логической необходимостью следует из принятых посылок. И если посылки истинны, то истинным будет и вывод, заключение.

*Индукция* (лат. *induction* – наведение) – логическое умозаключение, основанное на обобщении частной информации об устойчивой повторяемости признаков ряда явлений. Эта операция позволяет перейти от отдельных фактов и положений частного характера к общему знанию.

В индуктивных умозаключениях истинность посылок еще не означает истинности заключения.

*Изолирующая абстракция* заключается в отвлечении от несущественных для рассматриваемой задачи сторон и признаков рассматриваемого объекта (процесса, явления) и концентрации внимания на существенных признаках.



*Идеализирующая абстракция* заключается в замещении реального объекта некоторым идеальным объектом, моделью для упрощения процесса его изучения, лучшего понимания процессов и явлений, происходящих в реальном объекте. Например, в физике вводятся такие идеализирующие абстракции: абсолютно черное тело, нерастяжимая нить, материальная точка, идеальный газ и др.; в математике – точка, прямая, плоскость и др.

*Обобщающая абстракция* представляет собой логическую операцию обобщения над понятиями. Обобщающая абстракция применяется для получения общего представления о различных процессах и явлениях.

**Анализ и синтез.** *Анализ* (греч. *analysis* – разложение, расчленение) – процедура разложения объекта (процесса, явления) на составляющие части.

*Синтез* греч. *synthesis* – соединение, сочетание, составление) – метод научного исследования, состоящий в познании рассматриваемого объекта как единого целого, в единстве и взаимной связи его частей.

Синтез, с одной стороны, является методом познания и, с другой стороны, это метод практической деятельности. Синтезом, как методом практической деятельности, можно охарактеризовать такие процессы, как проектирование, конструирование. Ведь в результате этой деятельности человек из некоторых составных частей создает новый объект с требуемыми полезными свойствами.

**Моделирование.** В широком смысле модель – это любой образ, мысленный или предметный, замещающий рассматриваемый объект при его изучении. Объектом моделирования может быть как проектируемый объект, так и сама задача. Любая модель отображает не все свойства объекта, а только существенные для рассматриваемой задачи.

Как средство описания объектов модели можно охарактеризовать следующим набором свойств:

1) степень универсальности – характеризует объем процессов и явлений, которые могут быть описаны моделью;

2) точность – степень соответствия значений параметров, рассчитанных с помощью модели, значениям параметров реального процесса. Количественно эту степень соответствия определяют через погрешность параметра, как разность между действительным значением параметра и значением этого параметра, полученным с помощью модели;

3) адекватность (от лат. *adaequatus* – приравненный, равный, тождественный) – способность отображать заданные свойства объектов с погрешностью не выше заданной;

4) размерность – для структурных моделей характеризуется количеством компонентов и связей между ними;

5) экономичность – характеризуется затратами на подготовку исходных данных и вычислительных ресурсов (машинного времени, памяти) для ее реализации, а для физической модели – затратами на ее создание и получение результатов;

6) обозримость – характеризуется наглядностью и удобством представления модели для ее анализа.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Мозговой штурм: метод суда

Метод представляет собой одну из разновидностей деловых игр. Обсуждение поставленной задачи реализуется в виде судебного процесса: моделируется процесс над проблемой. Выбираются адвокат, прокурор, суд, присяжные и другие участники процесса.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

### Дополнения к символической аналогии

В табл. П.5.1 приведены общие закономерности метафоризации значений признаков слов.

*Таблица П.5.1*

### Закономерности и примеры метафоризации значений признаков слов

Откуда берется признак	На какой объект переносится	Примеры
Физические признаки предметов	Переносятся на человека	Жесткий руководитель, мягкий начальник, блестящий мыслитель, горький пьяница
Признаки и действия человека, животного	Переносятся на явления природы	Ветер завывает, небо плачет, солнышко играет, улыбается
Характеристика предмета	Преобразуются в характеристику отвлеченного понятия	Пустые слова, глубокая мысль, блестящая идея
Признаки природных (живых и неживых) объектов	Переносятся на человека	Ветреный человек, темная личность, зеленый специалист, пшеничные волосы, собачья верность

Для превращения незнакомого в знакомое можно воспользоваться известными метафорами. Например, Дж. Лакофф приводит в своей книге [12] метафоры, помогающие более полно раскрыть творческие идеи. Ключевой характер приводимых метафор закреплен в языке и в сознании, что подтверждается типичными выражениями.

Идеи – это пища (вариться в идее, пища для размышлений, брожение умов, законсервировать исследования).

Идеи – это люди (быть отцом современной теории, дитя ума, идеи давно погибли, вдохнуть новую жизнь в старую идею).

Идеи – это растения (идея принесла плоды, расцвет мысли, посеять зерна великих идей, бесплодные идеи).

Идеи – это изделия (отшлифовать идею, производить идеи, заточить мысль под проблему, сгладить острые углы идеи).

Идеи – это товар (как подать мысль, продать идею, идея не имеет ценности или ценная идея).

Идеи – это ресурсы (идеи кончились, полезная идея, использовать свою идею, объединить идеи).

Идеи – это деньги (быть богатым идеями, кладезь ума, подкинуть идею).

Идеи – это режущие инструменты (проницательный ум, идея попала в точку, острый ум, пронзила мысль, как обухом по голове).

Идеи – это мода (устаревшая идея, шикарная мысль, старомодные представления, популярные идеи).

Идеи – это источник света (вспыхнули идея, озарила мысль, блестящая идея, осветить проблему).

Для конструирования оксюморона можно использовать следующую методику:

1. Выбрать объект (ключевое понятие), дать ему краткую характеристику.

2. Определить его существенные признаки (в их число могут входить и функция объекта, и его принцип действия), записать их в столбик.

3. Подобрать к существенным признакам антонимы – понятия, противоположные по смыслу.

4. Подобрать антонимы, которые дают парадоксальную конструкцию с самим выбранным понятием.

5. Из полученного списка противоположных по смыслу пар выбрать те сочетания, которые дают красивое парадоксальное определение выбранного понятия.

Методом перебора вариантов создать несколько сочетаний существенных признаков и антонимов, подобрать объекты, которые определяются такими сочетаниями. Используя цепочку ассоциаций, подобрать к выбранному понятию, его существенным признакам и их антонимам несколько ярких метафор.

Таблица П.5.2

**Пример формирования оксюморона для понятия ультразвук**

Существенные признаки	Антонимы
Среда быстро передает колебания на расстояние	Среда не передает колебания
Неслышимый	Слышимый
Заставляет колебаться объекты	Гасит колебания объектов
Вызывает эрозию поверхности	Выравнивает углубления на поверхности
Отражается от препятствий	Проходит сквозь препятствия

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6**

**Межотраслевой фонд эвристических приемов преобразования объекта**

Разделение фонда на 15 групп и их состав определялись в основном удобствами и опытом практического применения и поэтому не претендуют на логическую строгость, научную обоснованность и полный охват всех приемов. Описание приемов, собранных в межотраслевом фонде, несколько унифицировано, сокращено и стилистически сглажено (в первоисточниках многие из них имеют явную эмоциональную окраску). Поэтому во многих приемах под указанием, например, «изменить» часто подразумевается «увеличить» или «уменьшить». Под «средой» наряду с природными факторами подразумеваются другие конструктивные элементы или технические системы, имеющие отношение к объекту.

**1. Количественные изменения**

1.1. Резко изменить (в несколько раз, в десятки и сотни раз) параметры или показатели объекта (его элементов, окружающей среды).

1.2. Увеличить в объекте число одинаковых или подобных друг другу элементов (или сделать наоборот). Инверсия приема.

1.3. Изменить число одновременно действующих или обрабатываемых объектов (элементов), например: рабочих машин, их органов, двигателей, движителей и т. д.

1.4. Изменить габариты, объем или длину объекта (элемента) при переводе его в рабочее или нерабочее состояние.

1.5. Осуществить накопление деталей, вещества, энергии, полуфабрикатов и т. п.

1.6. Произвести накопление малых доз до получения ощутимой величины.

1.7. Увеличить степень дробления (измельчения) объекта. Инверсия приема.

1.8. Увеличить эффективность действия путем последовательного применения группы однородных объектов (элементов).

1.9. Отказаться от высокой точности или стабильности параметров.

1.10. Допустить незначительное снижение требуемого эффекта.

1.11. Использовать идею избыточного решения (если трудно получить 100 % требуемого эффекта, получите «чуть больше»).

1.12. Изменить (усилить) вредные факторы настолько, чтобы они перестали быть вредными.

1.13. Осуществить подбор оптимальных значений параметров объекта, его элементов или окружающей среды (использовать пакет программ оптимизации).

1.14. Осуществить автоматический подбор оптимальных значений параметров в процессе работы объекта или при различных воздействиях внешней среды (использовать пакет программ оптимизации).

1.15. Унифицировать линейные размеры объекта (элемента) или другие его характеристики.

1.16. Уменьшить число функций объекта и сделать его более специализированным, соответствующим только оставшимся функциям и требованиям.

1.17. Гиперболизировать, значительно увеличить размеры объекта и найти ему применение. Инверсия приема.

1.18. Создать местное локальное качество; осуществить локальную концентрацию сил, напряжения и т. д.

## **2. Преобразования формы**

2.1. Изменить форму путем скручивания или изгиба (использовать круговую, спиральную, древовидную, сферическую, эллиптическую или другую компактную форму).

2.2. Сделать в объекте (элементе) отверстия или полости. Инверсия приема.

2.3. Проверить соответствие формы объекта законам симметрии. Перейти от симметричной формы и структуры к асимметричной. Инверсия приема.

2.4. Перейти от прямолинейных частей, плоских поверхностей кубических и многогранных форм (особенно в местах сопряжений) к криволинейным, сферическим и обтекаемым. Инверсия приема.

2.5. Объекту (элементу), работающему под нагрузкой, придать выпуклую (более выпуклую) форму.

2.6. Использовать периодическое изменение формы в пространстве или во времени.

2.7. Вывернуть форму «наизнанку» или изменить традиционную форму.

2.8. Преобразовать форму с учетом уменьшения «неработающей» поверхности или пространства.

2.9. Компенсировать нежелательную форму сложением с противоположной по очертанию формой.

2.10. Выполнить объект (элемент) в форме:

– другого технического объекта, имеющего аналогичное назначение;

– животного, растения или их органа;

– человека или его органов;

– другого технического объекта, имеющего совершенно иное назначение, животного или растения с целью создания ложного представления.

2.11. Сделать объект (элемент), приспособленный к форме человека или его органов.

2.12. Использовать в аналогичных условиях работы природный принцип формообразования в живой или неживой природе.

2.13. Изменить форму объектов среды с помощью перечисленных выше приемов.

2.14. Осуществить подбор оптимальной формы по заданному критерию качества. Например, с целью экономии материала, использования принципа равнопрочности или повышения усталостной прочности, снижения сопротивления в жидкостях и газах и т. д. (использовать пакет программ оптимизации).

2.15. Предусмотреть изменение формы как реакцию на изменение внешних условий, среды или условий работы (осуществить авторегуляцию; использовать пакет программ оптимизации).

2.16. Найти наибольшую цельную форму объекта (зрительное выделение главного функционального элемента, устранение или прикрытие многих ненужных деталей и т. д.).

2.17. Использовать различные виды симметрии и асимметрии, динамические и статические свойства формы, ритма (чередования одинаковых или схожих элементов), нюансов и контраста.

2.18. Осуществить гармоническую увязку форм различных элементов (выбор масштабов и соотношений между объектами и окружающей предметной средой, использование эстетически предпочтительных пропорций).

2.19. Выбрать (придумать) наиболее красивую форму объекта и его элементов.

### **3. Преобразования в пространстве**

3.1. Заменить традиционную ориентацию объекта (элемента) в пространстве на противоположную. Например:

- горизонтальное положение на вертикальное или наклонное;
- положить на бок;
- повернуть низом вверх;
- повернуть вокруг вертикальной оси.

3.2. Использовать «пустое пространство» между элементами объекта; один элемент проходит сквозь полость в другом элементе.

3.3. Объединить известные порознь объекты (элементы) с размещением одного внутри другого; один элемент по принципу «матрешки» размещается внутри другого, который, в свою очередь, находится внутри внешнего.

3.4. Размещение по одной линии заменить размещением по нескольким линиям или по плоскости. Инверсия приема.

3.5. Заменить размещение по плоскости размещением по нескольким плоскостям или в трехмерном пространстве; перейти от одноэтажной (однослойной) компоновки к многоэтажной (многослойной). Инверсия приема.

3.6. Изменить направление действия рабочей силы или среды.

3.7. Перейти от контакта в точке к контакту по линии; от контакта по линии к контакту по поверхности; от контакта по плоскости к объемному (пространственному). Инверсия приема.

3.8. Осуществить сопряжение по нескольким поверхностям.

3.9. Приблизить рабочие органы объекта к месту выполнения ими своих функций без передвижения самого объекта.

3.10. Заранее расставить объекты так, чтобы они могли вступить в действие с наиболее удобного места и без затрат времени на их доставку.

3.11. Возвратить объект (элемент) к исходной точке, начальному положению.

3.12. Разделить объект на части так, чтобы приблизить каждую из них к тому месту, где она работает и непосредственно нужна.

3.13. Разделить объект на две части – «объемную» и «необъемную»; вынести «объемную» часть за пределы, ограничивающие объем.

3.14. Вынести элементы, подверженные действию вредных факторов, за пределы их действия.

3.15. Перенести (поместить) объект или его элемент в другую среду, исключаящую действие вредных факторов.

3.16. Выйти за «традиционные» пространственные ограничения или габариты.

3.17. Поменять местами противоположно размещенные и другие элементы.

3.18. Перейти от последовательного соединения элементов к параллельному или смешанному. Инверсия приема.

3.19. Растянуть или расширить объект, удалив друг от друга элементы, или сблизить удаленные элементы.

3.20. Обособить (локализовать) размещение групп элементов в пространстве. Инверсия приема.

3.21. Существенно изменить компоновку элементов, преобразовав ее или переставив элементы в другом порядке.

3.22. Придать объекту свойства, обеспечивающие изменение компоновки элементов при воздействии внешней среды или изменении условий работы.

3.23. Осуществить выбор оптимальной компоновки и размещения элементов или оптимальной ориентации объекта в пространстве (использовать пакет программ оптимизации).

#### **4. Преобразования во времени**

4.1. Изменить время функционирования или существования объекта (элемента); растянуть или сжать во времени происходящее действие; ускорить (замедлить) процесс осуществления операции.

4.2. Выполнить требуемое действие до начала работы. Инверсия приема (выполнить после окончания работы).

4.3. Перенести выполнение действия на другое время.

4.4. Перейти от непрерывной подачи энергии или непрерывного режима к периодическому или импульсному. Инверсия приема.

4.5. Если действие осуществляется периодически, изменить периодичность. Перейти от постоянного (во времени) к изменяющемуся режиму. Инверсия приема.

4.6. Перейти от фиксированного физического поля к изменяющемуся во времени. Инверсия приема.



4.7. Превратить асинхронный процесс (действие) в синхронный. Инверсия приема.

4.8. Изменить последовательность операций.

4.9. Перейти от последовательного осуществления операций к параллельному (одновременному). Инверсия приема.

4.10. Совместить технологические процессы или операции. Объединить однородные или смежные операции. Инверсия приема.

4.11. Исключить бесполезные («вредные») интервалы времени. Использовать паузу между импульсами (периодическими действиями) для осуществления другого действия.

4.12. Ввести обратную связь в управление процессом, при необходимости автоматизировать управление объектом (использовать пакет программ оптимизации).

4.13. Характеристики объекта (масса, габариты, скорость, температура, агрегатное состояние и т. д.) должны быть меняющимися и оптимальными на каждом этапе процесса или на новом режиме (использовать пакет программ оптимизации).

### **5. Преобразование движения**

5.1. Изменить направление вращения.

5.2. Заменить поступательное (прямолинейное) движение вращательным. Инверсия приема.

5.3. Заменить возвратно-поступательное движение вращательным. Инверсия приема.

5.4. Существенно изменить направление движения, в том числе на противоположное.

5.5. Заменить традиционную сложную траекторию движения на движение по прямой или окружности. Инверсия приема.

5.6. Изменить число степеней свободы движения:

– по прямой линии заменить движением по плоскости (в двух измерениях);

– по плоскости заменить движением в трехмерном пространстве;

– по одной линии заменить движением по нескольким линиям;

– по одной плоскости заменить движением по нескольким плоскостям. Инверсия приема.

5.7. Разделить объект на две части – «тяжелую» и «легкую», передвигать только «легкую» часть.

5.8. Изменить условия работы так, чтобы не приходилось поднимать или опускать обрабатываемый объект.

5.9. Устранить обратные и холостые ходы.

5.10. Перейти от неподвижного физического поля к движущемуся. Инверсия приема.

5.11. Изменить характер функционального соединения между элементами, повысив степень свободы перемещения одних по отношению к другим. Инверсия приема.

5.12. Разделить объект на части, способные перемещаться относительно друг друга.

5.13. Преобразовать неподвижный объект (элемент) в подвижный; обеспечить перемещение элемента в объекте. Инверсия приема.

5.14. Сделать движущиеся элементы неподвижными, а неподвижные – движущимися.

5.15. Сделать объект (элемент) качающимся или привести в колебательное движение. Инверсия приема.

5.16. Изменить условия работы так, чтобы опасные или вредные моменты осуществлялись на большой скорости. Инверсия приема.

5.17. Придать объекту (элементу) движение, аналогичное движению органов человека или животного.

5.18. Подобрать оптимальные характеристики движения (использовать пакет программ оптимизации).

## **6. Преобразование материала**

6.1. Рассматриваемый элемент и взаимодействующие с ним должны быть сделаны из одного и того же материала или близкого ему по свойствам. Инверсия приема.

6.2. Выполнить элемент или его поверхность из пористого материала. Заполнить поры каким-нибудь веществом.

6.3. Перейти от однородных материалов к композиционным. Инверсия приема.

6.4. Сделать объект (элемент) прозрачным. Инверсия приема.

6.5. Разделить объект (элемент) на части так, чтобы каждая из них могла быть изготовлена из наиболее подходящего материала.

6.6. Убрать лишний материал, не несущий функциональной нагрузки.

6.7. Для наблюдения за плохо видимыми объектами или процессами использовать красящие добавки, меченые атомы и т. п.

6.8. Изменить поверхностные свойства объекта (элемента); упрочить поверхность объекта; нейтрализовать свойства материала на поверхности объекта.

6.9. Выполнить жесткую часть из материала, допускающего изменение формы при работе; вместо жестких объемных конструкций использовать гибкие оболочки и пленки. Инверсия приема.

- 6.10. Изменить физические свойства материала.
- 6.11. Заменить некоторые объекты среды на объекты с другими физико-механическими и химическими свойствами.
- 6.12. Использовать другой материал: заменить более дешевым, взять новейший материал, заменить используемый материал его эквивалентом и т. д.
- 6.13. Присоединить новый ингредиент или заменить его.
- 6.14. Использовать детали из материала с последующим отверждением.
- 6.15. Выполнить элементы из материалов с разными характеристиками, дающими нужный эффект (например, с разным термическим расширением).
- 6.16. Вместо твердых частей использовать жидкие или газообразные (надувные, гидронаполняемые, воздушную подушку, гидростатические, гидрореактивные). Инверсия приема.
- 6.17. Подобрать оптимальные физические свойства материалов (использовать пакет программ оптимизации).
- 6.18. Использовать материал с изменяемыми во времени характеристиками (жесткостью, прозрачностью и т. д.).
- 6.19. Иметь оптимальные характеристики материала в различные моменты, этапы работы объекта (использовать пакет программ оптимизации).

### ***7. Преобразования исключением***

- 7.1. Исключить трущиеся поверхности, в первую очередь на корпусных деталях.
- 7.2. Исключить наиболее напряженный (нагруженный) элемент.
- 7.3. Устранить местные ослабления.
- 7.4. Выполнивший свое назначение или ставший ненужным элемент отбросить (отцепить, сжечь, растворить, испарить и т. д.).
- 7.5. Исключить бесполезные или вредные промежутки времени.
- 7.6. Исключить подбор и подгонку (регулировку и выверку) деталей и узлов при сборке объекта.
- 7.7. Отделить вредные или нежелательные примеси от вещества.
- 7.8. Выделить в объекте вредное свойство или «мешающий» элемент и изолировать его или оказать на него локальное «устраняющее» воздействие.
- 7.9. Исключить элемент и его функцию из объекта.
- 7.10. Уменьшить число функций объекта и сделать его более специализированным, соответствующим только оставшимся функциям и требованиям.

7.11. Исключить элемент, сохранить все прежние функции объекта. Один элемент выполняет несколько функций, благодаря чему отпадает необходимость в других элементах.

7.12. Исключить некоторые объекты и факторы среды.

7.13. Ликвидировать вредные факторы за счет элементов, имеющих другое назначение.

7.14. Устранить вредный фактор за счет сложения его с другим вредным фактором.

7.15. Исключить элементы в связи с полной или существенной утратой (или изменением) их первоначальной функции. Убрать «лишние детали», изменив при необходимости характер соединения между оставшимися и потеряв «один процент» эффекта.

7.16. Отказаться от использования стандартных и унифицированных элементов.

### **8. Преобразования добавлением**

8.1. Обеспечить автоматическую подачу смазки к трущимся частям.

8.2. Присоединить к объекту новый элемент в виде жестко или шарнирно соединенной пластины (стержня, оболочки или трубы), находящейся в рабочей среде в контакте с ней.

8.3. Компенсировать массу объекта, соединив его с элементом (объектом), обладающим подъемной силой.

8.4. Изолировать объект (элемент) от внешней среды с помощью гибких оболочек и тонких пленок. Поместить объект в оболочку, гильзу, капсулу. Инверсия приема.

8.5. Расходуемые элементы должны восстанавливаться непосредственно в процессе работы.

8.6. Присоединить к базовому объекту дополнительные специализированные орудия (элементы).

8.7. Выполнение операции (или изготовление объекта) осуществлять с применением специального оборудования или инструмента.

8.8. Ввести элементы, допускающие или обеспечивающие сборку объекта только в нужном положении.

8.9. Придать объекту новое свойство: обеспечить его плавучесть, герметизацию, самовосстановление, сделать его прозрачным, электропроводным и т. п.

8.10. Сделать объект (элемент) самоустанавливающимся, саморегулирующимся.

8.11. Использовать «посредника» в виде промежуточного объекта – переносчика энергии, силы, массы и т. п.

8.12. Противопоставить вредному эффекту тот же эффект «взятый наоборот».

8.13. Приспособить объект к взаимодействию с человеком; сделать так, чтобы объект вызывал положительные эмоции.

8.14. Сделать элементы взаимозаменяемыми.

8.15. Осуществить комплексную нормализацию элементов.

### **9. Преобразования заменой**

9.1. Заменить изгиб растяжением или сжатием.

9.2. Заменить трение скольжения трением качения. Инверсия приема.

9.3. Заменить механическую обработку способом без снятия стружки.

9.4. Перейти от последовательного соединения элементов к параллельному или смешанному. Инверсия приема.

9.5. Заменить традиционную воздушную среду; рассмотреть возможность использования вакуума, инертной, водной, космической или какой-либо другой среды.

9.6. Заменить объекты (элементы) их оптическими копиями (изображениями); использовать изменение масштаба изображения. Перейти от видимых оптических копий к инфракрасным, ультрафиолетовым и другим изображениям.

9.7. Вместо недоступного, сложного, дорогостоящего, неудобного или хрупкого объекта использовать его упрощенные и дешевые копии, модели, макеты.

9.8. Заменить связи (способ или средства соединения) между элементами, жесткую связь гибкой. Инверсия приема.

9.9. Изменить крепление объекта (элемента) на противоположное.

9.10. Дорогостоящий долговечный элемент заменить дешевым, недолговечным.

9.11. Осуществить превращение одних физических величин в другие.

9.12. Осуществить обратную связь с помощью других величин.

9.13. Заменить аналог или модель объекта.

9.14. Заменить в объекте источник энергии, тип привода, цвет и т. д.

9.15. Заменить механическую схему электрической, тепловой, оптической или электронной.

- 9.16. Произвести замену конструкции (узла) ее эквивалентом.
- 9.17. Заменить объект (элемент) более простым.
- 9.18. Заменить объект (элемент) аналогичным по своему функциональному назначению (противоположным). Инверсия приема.
- 9.19. Вместо действия, диктуемого условиями задачи, осуществить обратное действие (например, не охлаждать объект, а нагревать).
- 9.20. Использовать принцип действия, явления, процессы, приемы и свойства, диаметрально противоположные (обратные) традиционным и имеющимся.
- 9.21. Заменить принцип работы объекта (элемента) эквивалентным. Использовать другой принцип действия.
- 9.22. Несколько специализированных объектов заменить одним универсальным. Инверсия приема.
- 9.23. Заменить разнородные по материалу и форме элементы одним унифицированным.
- 9.24. Заменить несколько однородных элементов одним стандартным.

## **10. Дифференциация**

- 10.1. Разделить движущийся поток (вещества, энергии, информации и др.) на два или несколько.
- 10.2. Разделить сыпучий, жидкий или газообразный объект на части.
- 10.3. Поверхность трения выполнить из отдельных легко заменяемых деталей.
- 10.4. Сделать элемент съемным, легко отделимым.
- 10.5. Применить раздвижную конструкцию из элементов, перемещающихся в пространстве относительно друг друга.
- 10.6. Разделить сложную силу так, чтобы для каждой составляющей имелся воспринимающий элемент или свой привод.
- 10.7. Сделать автономным управление и привод каждому элементу.
- 10.8. Раздробить традиционный целый объект на мелкие однородные элементы с аналогичной функцией. Инверсия приема.
- 10.9. Разделить объект на части, после чего изготавливать, обрабатывать, грузить и т. п. каждую часть отдельно, а затем производить сборку.
- 10.10. Разделить объект на части так, чтобы их можно было заменять при изменении режима работы.
- 10.11. Разделить технологический процесс (объект) на несколько специализированных этапов, операций или элементов.

10.12. Разделить объект на части: «горячую» и «холодную»; изолировать одну от другой. Использовать принцип специализации объектов.

10.13. Разделить функции объекта; разные элементы должны выполнять различные функции.

10.14. Представить объект в виде составной конструкции; изготовить его из отдельных элементов.

10.15. Разделить объект на секции и сделать его секционным, ячеистым и т. п.

10.16. Придать блочную структуру объекту; каждый блок выполняет самостоятельную функцию.

10.17. Выделить в объекте самый нужный элемент (нужное свойство) и усилить его или улучшить условия его работы.

10.18. Уменьшить взаимозависимость элементов; уменьшить силу связей между ними; разделить объект на части и соединить их гибкой связью; разделить объект на независимые части.

10.19. Перейти от однородной структуры объекта или внешней среды к неоднородной. Перейти от однородного поля к полю, имеющему определенную структуру.

10.20. Разделить объект (элемент) на одинаковые секции и произвести унификацию секций.

10.21. Раздробить семейство (множество) родственных объектов так, чтобы их можно было изготавливать из стандартных или унифицированных элементов.

## **11. Интеграция**

11.1. Сосредоточить органы управления и контроля в одном месте.

11.2. Объединить элементы единым корпусом или станиной.

11.3. Осуществить параллельное соединение машин и агрегатов для увеличения общей мощности или производительности.

11.4. Ввести единый привод, единую систему управления, энергоснабжения или питания.

11.5. Соединить аналогичные объекты (элементы), последовательно присоединяя их к связующему нитевидному элементу.

11.6. Изготовить объект целым.

11.7. Объединить микромодули. Собрать объект из модульных элементов.

11.8. Соединить однородные или предназначенные для смежных операций объекты.

11.9. Используя одновременно два и более однотипных объекта с разными количественными характеристиками, получить качественно новый эффект.

11.10. Объединить в одно целое объекты (элементы), имеющие самостоятельное назначение, которое сохраняется после объединения в новом комплексе.

11.11. Создать объект, объединить два или несколько элементов самостоятельного назначения, чтобы они полностью или частично включались один в другой.

11.12. Использовать принцип агрегатирования. Создать базовую конструкцию, на которую можно «навесить» различные рабочие органы и агрегаты.

11.13. Создать местное локальное качество; осуществить локальную концентрацию сил, напряжения и т. п.

11.14. Объединить стандартные или унифицированные элементы, узлы и детали.

11.15. Совместить или объединить явно несовместимые объекты, устранив возникающие противоречия.

11.16. Осуществить симбиоз объекта с человеком или живым организмом.

## ***12. Использование профилактических мер***

12.1. Предусмотреть прикрытие и защиту легко повреждаемых элементов.

12.2. Ввести предохранительные устройства или блокировку.

12.3. Разделить хрупкий и часто повреждаемый объект на части.

12.4. Выполнить объект (элемент) разборным так, чтобы можно было заменить отдельные поврежденные части.

12.5. Для уменьшения простоев и повышения надежности создать легко используемый запас рабочих органов или элементов. Предусмотреть в ответственных частях объекта дублирующие элементы.

12.6. Защитить элемент от воздушной или другой агрессивной среды.

12.7. Защитить объект (элемент) от электростатического или другого вредного поля.

12.8. Произвести экранирование объекта.

12.9. Заранее придать объекту напряжения, противоположные недопустимым или нежелательным рабочим напряжениям.

12.10. Заранее придать элементам изменения, противоположные недопустимым или нежелательным изменениям, возникающим в процессе работы.



12.11. Заранее выполнить требуемое изменение объекта (полностью или хотя бы частично).

12.12. Рассредоточить деформируемые участки объекта (элемента).

12.13. Заложить резервные возможности главного элемента (двигателя, генератора, несущей конструкции и т. п.), который может сдерживать прогрессивную эволюцию или модернизацию объекта.

12.14. Предусмотреть компенсацию неточностей изготовления объекта.

12.15. Разделить объект на части так, чтобы при выходе из строя одного элемента объект в целом сохранял работоспособность.

12.16. Для повышения надежности заранее подготовить аварийные средства.

12.17. Использовать принцип снижения нагрузки.

12.18. Путем моделирования (мысленного, математического, физического и т. п.) допустить различные аварийные состояния, после чего внести в объект конструктивные изменения, устраняющие причины возникновения аварийных состояний.

### **13. Использование резервов**

13.1. Использовать массу объекта (элемента) или периодически возникающих весовых и других усилий для получения дополнительного эффекта.

13.2. Использовать силу ноги (ног) или другого органа тела.

13.3. Допустить факторы и явления, которые считаются недопустимыми. При особой необходимости оказать некоторое компенсирующее воздействие.

13.4. Использовать паузы между импульсами (периодическими действиями) для осуществления другого действия.

13.5. Компенсировать чрезмерный расход энергии получением какого-либо дополнительного эффекта.

13.6. Расширить номенклатуру обрабатываемых деталей. Применить групповую обработку.

13.7. Один объект (элемент) поочередно работает в нескольких местах.

13.8. Использовать оптические потоки (или потоки каких-либо частиц), падающие на имеющиеся или дополнительные площади.

13.9. Увеличить число последовательно или одновременно выполняемых функций объектом (элементом).

13.10. По принципу непрерывного полезного действия осуществлять работу объекта (элемента) непрерывно, без холостых ходов. Все элементы объекта должны все время работать с полной нагрузкой.

13.11. По принципу самообслуживания объект должен выполнять не только основную работу, но и сам себя обслуживать, выполняя вспомогательные и ремонтные операции, используя отходы энергии, вещества и т. п.

13.12. Выполнивший свое назначение или ставший ненужным элемент, отходы (энергия, вещество) должны быть наиболее эффективно использованы для других целей.

13.13. Использовать вредные факторы (в частности, вредные воздействия среды) для получения положительного эффекта.

13.14. Превратить причину в эффект.

13.15. После конструктивного улучшения какого-либо элемента определить, как должны быть изменены другие элементы, чтобы эффективность объекта в целом еще повысилась.

#### **14. Преобразования по аналогии**

14.1. Применить объект, используемый для этих же целей в другой отрасли техники.

14.2. Использовать природный принцип повторяемости однотипных элементов (пчелиные соты, клетки, листья, кристаллы и т. п.).

14.3. Рассмотреть возможность копирования.

14.4. Применить решение, аналогичное имеющемуся:

– в ведущей отрасли техники или в древних и прошлых технических объектах;

– в неживой природе (физика, химия, биология и др.);

– у современных или вымерших живых организмов;

– в экономике или общественной жизни людей;

– в научно-фантастической литературе.

Ответить на вопрос, как решаются подобные задачи в указанных областях. Перенести в свой объект аналогичный элемент. Выполнить аналогично компоновку, структуру, принцип действия и т. п.

14.5. Использовать аналогии свойств других объектов, а также свойства объекта.

14.6. Использовать принцип имитации, заключающийся в создании таких объектов, которые по форме, цвету, внешнему виду аналогичны другому объекту, но по ряду других свойств не соответствуют ему.

14.7. Выполнить объект по аналогии с одним особо значащим элементом другого объекта. Инверсия приема (второстепенный элемент).

14.8. Применить вещество (элемент), аналогичное ферментам или катализаторам.

14.9. Использовать эмпатию: мысленно превратите себя в объект (элемент) и с помощью своих ощущений найдите наиболее целесообразное решение.

14.10. Приспособить природные конструкции для технических целей.

14.11. Использовать аналогии функции и поведение других объектов.

14.12. Проверить, как решаются задачи обратные данной.

### **15. Комбинирование и комплексный синтез**

15.1. Гиперболизировать размеры объекта, создать «гигант» и найти ему применение. Инверсия приема (миниатюризация).

15.2. Рассмотреть возможность использования различных энергетических установок (видов энергии) и их комбинации.

15.3. Создать объект (машину), сочетая унифицированные элементы (агрегаты), представляющие собой автономные узлы, устанавливаемые в различном числе и комбинациях, на общей станине.

15.4. Базовый объект или основные его элементы использовать для создания объектов различного назначения, близких или различных по рабочему процессу.

15.5. Комбинировать универсальные элементы для осуществления различных функций.

15.6. Комбинировать: секции, узлы, блоки, агрегаты; универсальные элементы; переходные состояния.

15.7. Сделать объект компактным; изменить объект конструктивно, обеспечив его портативность.

15.8. Создать комплекс, гарнитур и т. п.

15.9. Комбинировать привлекательные признаки и свойства объекта, технические идеи.

15.10. Рассмотреть комбинированное использование различных принципов действия.

15.11. Переделать объект, приспособив его к другим условиям работы: операциям, видам продукции — без изменения основной конструкции.

15.12. Использовать в качестве прототипа искомого объекта объект неживой или живой природы, близкие или отдаленные области техники, детские игрушки.

15.13. Создать технический объект, моделирующий живой организм.

15.14. Рассмотреть возможность использования различных физических эффектов и их комбинаций.

15.15. Перейти от однофункционального объекта к многофункциональному. Комбинировать функции или цели.

15.16. Применить известный объект для другого назначения. Использовать объект в другой области, одновременно изменив его функции.

15.17. Придумать для известного объекта новую функцию. Найти новую область или способ применения объекта.

15.18. Придумать новую функцию, техническая реализация которой принесет значительное улучшение для жизни и работы человека.

15.19. Сформулировать (синтезировать) идеальное конструктивное решение и перейти от него к реальному.

15.20. Найти новое применение найденной идеи или идеи обратной найденной.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

### **О терминологии, применяемой по противоречиям в технических задачах**

Современная теория решения изобретательских задач (ТРИЗ) предусматривает анализ причин технических противоречий (ТП) и переход от технического к **физическому противоречию (ФП)**.

Техническое противоречие представляет собой конфликт двух частей системы; для перехода к ФП необходимо выделить одну часть, а в этой части одну зону, к физическому состоянию которой предъявляются взаимопротиворечивые требования. Формулируется ФП так: «Данная зона должна обладать свойством А (например быть подвижной), чтобы выполнять такую-то функцию, и свойством не-А (например быть неподвижной), чтобы удовлетворять требованиям задачи».

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8

### **Метафорическое описание и анализ проблемной ситуации**

*Метафорическое описание и анализ проблемной ситуации* – это генерирование дополнительной информации об этой ситуации путем метафоризации ключевых слов – основных понятий о вещах, их свойствах и отношениях, связанных с ней. Описание рассматриваемой и аналогичных проблемных ситуаций осуществляется посредством различных метафор:

а) **бинарных метафор-аналогов** (прилагательное + существительное: «горькая чаша», «веселая байдарка»; глагол + существительное: «вздыхает домна», «колокольчик хохочет»; существительное + существительное: «хмель победы», «пруд забот»);

б) **бинарных метафор-катахрез**, содержащих противоречие между именем существительным и прилагательным («правдивая ложь», «неграмотный писатель»);

в) **метафор-загадок** («сотни глаз мечут стог» – сито).

Интерпретация метафорических описаний посредством их перевода в технические термины дает отражение одного фрагмента объективной действительности в другом, что обеспечивает возможность выводов по аналогии, позволяющих получить новую информацию о проблемной ситуации. При выполнении этой группы процедур рекомендуется использовать табл. П.8.1.

Таблица П.8.1

### Примеры метафор и их интерпретаций

Ключевое слово	Вид метафоры			Пример интерпретации
	метафора-аналог	метафора-катахреза	метафора-загадка	
Мечта	Оракул души	Сон наяву	В уме все ясно, от глаз скрыто	Речь, язык, идеальная машина, звук, прогноз, идея
Пила	Челюсть дракона	Однорядные зубы	Скоро ест и мелко жует, сама не глотает и другим не дает	Кость, пламя, фасонная фреза, щековая дробилка, гидромонитор
Воздух	Невидимая среда	Материальный дух	Что топором не перерубишь?	Вакуум, спирт, пневмотранспорт, луч, тень, ветер, оценка
Тормоз	Ингибитор скорости	Активный реакционер	Сам не бежит и другим не дает	Сопротивление, ров, реактивная турбина, фенол, магнит, барьер
Маска	Провокационная личина	Очевидная тайна	Красный бес на лицо влез	Карикатура, Луна, шифр, код, помада

## ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Данная таблица содержит образцы применения основных функций применительно к станкостроению.

## Десятичная матрица поиска Р. П. Повилейко применительно к станкостроению

Основные группы показателей	Основные функции и примеры применения									
	Неология	Адаптация	Мультипликация	Дифференциация	Интеграция	Инверсия	Импульсация	Динамизация	Аналогия	Идеализация
1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
Геометрические показатели	Традиционные тумбы-«пьедесталы» в станках	Вертикальная компоновка токарного станка («положить набок»)	Многоэтажные инструментальные тумбочки	Подвесные пульта управления	Закрытое исполнение механизмов (кожухи)	Некруглые валы	Телескопические трубы для прутков в револьверных станках	Гибкий проволочный вал	Торцевая рейка-улитка	Отказ от механической обработки, «исчезновение» станков
2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
Физико-механические показатели	Железобетон в станкостроении (станины)	Масляный туман для охлаждения обработки деталей	Алмазная обработка металлов	Жидкостная полировка	Фотоэлектронное копирование (механическая обработка)	Гибкие («резиновые») магниты для крепления деталей	Штамповка взрывом	Сплавы, возвращающие формы деталям при нагреве	Хромоплатовые модели станков («хамелеоны»)	Шлифовальная головка на воздушной подушке
3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
Энергетические показатели	Пневмопривод и гидропривод в станкостроении	Электроизоляционные покрытия из полимеров	Использование лазера для металлов	Разделенные приводы в станке	Единый привод станка	Реверсирование электродвигателя	Двухскоростные двигатели в станках	Стабилизаторы энергии	Оценка мощности привода, л. с.	Авторегуляция мощности в станках

Основные группы показателей	Основные функции и примеры применения									
	Неология	Адаптация	Мультипликация	Дифференциация	Интеграция	Инверсия	Импульсация	Динамизация	Аналогия	Идеализация
<b>4</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>	<b>4.3</b>	<b>4.4</b>	<b>4.5</b>	<b>4.6</b>	<b>4.7</b>	<b>4.8</b>	<b>4.9</b>	<b>4.10</b>
Конструктивно-технологические показатели	Замена механических схем в станках электрическими	Замена механического зажима деталей гидравлическим	Шариковая гайка с ходовым винтом	Раздаточный вал с кулачками	«Свернутые» кинематические схемы	Вращение деталей вокруг инструментальных головок	Долбление, строгание	Волновые передачи	Автоматические «руки» (манипуляторы)	Гидростатические воздушные опоры
<b>5</b>	<b>5.1</b>	<b>5.2</b>	<b>5.3</b>	<b>5.4</b>	<b>5.5</b>	<b>5.6</b>	<b>5.7</b>	<b>5.8</b>	<b>5.9</b>	<b>5.10</b>
Надежность и долговечность	Использование нержавеющей стали, титановых сплавов в станкостроении	Упрочняющая обработка поверхности шпинделя	Лабиринтные уплотнения	Струйная целенаправленная смазка колес	Моноблочные станины станков	Инструмент разового пользования	Магнитное крепление деталей при шлифовании	Зажим заготовки силами резания	Самозатачивающиеся многослойные резцы	Предохранители (например, предохранители муфты)
<b>6</b>	<b>6.1</b>	<b>6.2</b>	<b>6.3</b>	<b>6.4</b>	<b>6.5</b>	<b>6.6</b>	<b>6.7</b>	<b>6.8</b>	<b>6.9</b>	<b>6.10</b>
Эксплуатационные показатели	Программное управление для станков	Разработка технологии обработки деталей на ЭВМ	Многорезцовое продольное точение	Разгруженный шпиндель	Комбинированный инструмент	Вибрационное стружколомание	Блокировка поступления охлаждающей жидкости	Бесступенчатые вариаторы	Моделирование процессов резания	Регулирование скорости в зависимости от усилий резания

Основные группы показателей	Основные функции и примеры применения									
	Неология	Адаптация	Мультипликация	Дифференциация	Интеграция	Инверсия	Импульсация	Динамизация	Аналогия	Идеализация
<b>7</b>	<b>7.1</b>	<b>7.2</b>	<b>7.3</b>	<b>7.4</b>	<b>7.5</b>	<b>7.6</b>	<b>7.7</b>	<b>7.8</b>	<b>7.9</b>	<b>7.10</b>
Экономические показатели	Использование пластмасс в станкостроении	Капроновые шестерни в коробках передач	Кассетная загрузка деталей	Специализированные (операционные) станки	Преселективное управление	Вихревое нарезание резьбы	. Устранение холостых ходов	Корректировка норм по реальной выработке	Упаковка типа «кон» (для станков)	Автоматизация механической обработки
<b>8</b>	<b>8.1</b>	<b>8.2</b>	<b>8.3</b>	<b>8.4</b>	<b>8.5</b>	<b>8.6</b>	<b>8.7</b>	<b>8.8</b>	<b>8.9</b>	<b>8.10</b>
Степень стандартизации и унификации	Использование смежных систем стандартов	Использование общих рекомендаций по эргономике для отраслевого стандарта	Многошпиндельные станки	Гидросхема из стандартных элементов	Агрегатные станки	Отказ от стандартных элементов	Текущая заводская нормализация	Опережающая (динамическая) стандартизация	Сотовые панели в корпусных деталях	Тотальная (всеобъемлющая) стандартизация
<b>9</b>	<b>9.1</b>	<b>9.2</b>	<b>9.3</b>	<b>9.4</b>	<b>9.5</b>	<b>9.6</b>	<b>9.7</b>	<b>9.8</b>	<b>9.9</b>	<b>9.10</b>
Удобство обслуживания и безопасность	Использование смежных рекомендаций по эргономике	Коррективная эргономика	Многостаночное обслуживание	Комбинированное освещение станков	Передача наладочных функций станочнику	Глушение шума шумом (фазоинвертор)	Подвижное сиденье токаря	Возрастание усилий при управлении (критические режимы)	Моделирование поведения оператора	Биоуправление станочными операциями



Основные группы показателей	Основные функции и примеры применения									
	Неология	Адаптация	Мультипликация	Дифференциация	Интеграция	Инверсия	Импульсация	Динамизация	Аналогия	Идеализация
10	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	10.10
Художественно-конструкторские показатели	Использование улучшенных корпусных деталей	Стилизация форм станка	Модульное проектирование форм станков	«Открытые» формы станков	«Закрытые» формы станков	Контрастное решение панелей управления	Сменные цветные экраны (фон) при обработке деталей	Динамическое искусство на производстве	Биодизайн (биоформы узлов станка)	Комплексное проектирование среды (ансамбль)

### Примеры использования физико-технических эффектов

При решении конструкторских задач часто и весьма эффективно используются различные физико-технические эффекты (табл. П.10.1) [14]. Изменение носителей эффекта (например, резина, пружина для реализации упругости), сочетание различных эффектов в одном механизме открывают практически неограниченные возможности для конструирования.

*Центробежные силы* используются для разделения материалов различной плотности (например, СОЖ и масла в центрифуге), фильтрации масел в центробежных фильтрах, закрепления изделий в кулачках токарных автоматов, для изменения натяга в шпиндельных подшипниках качения в зависимости от частоты вращения и т. п. Центробежный эффект применяют для уплотнения (схема 1, а, табл. П.10.1) и для смазывания разбрызгиванием (схема 1, б, табл. П.10.1).

*Инерция* может использоваться в делительных механизмах, когда в конце деления привод отключается (для уменьшения удара) и механизм вращается по инерции, для гашения колебаний и т. д. В приводе главного движения зубофрезерного станка установлен маховик 1 (схема 2, а, табл. П.10.1), который повышает равномерность вращения червячной фрезы 2, компенсируя неблагоприятные условия резания, вызванные прерывистым процессом фрезерования.

На схеме 2, б (табл. П.10.1) инерция шпинделя 3 используется при аварийных ситуациях в качестве привода насоса 4, питающего карманы гидростатических опор шпинделя. В результате внезапного отключения энергии муфта 5 соединяет шпиндель с насосом и гидростатические опоры будут снабжаться маслом в течение всего времени выбега, предотвращая аварию.

*Клин, рычаг, эксцентрик* или их сочетания при конструировании применяются практически беспредельно. Для закрепления заготовок 1 и 3 используется клиновой зажим 2 (схема 3, а, табл. П.10.1) или сочетание рычага 4 и эксцентрика 5 (схема 3, б, табл. П.10.1).

*Гидростатический эффект* (гидростатические силы) находит применение в силовых механизмах для реализации больших усилий при малых размерах устройств. В схеме 4, а (табл. П.10.1) при подаче масла под давлением осуществляется прямое вращение ротора 1. В схеме 4, б (табл. П.10.1) с помощью гидроцилиндра 2 производится

компенсация веса шпиндельной бабки 3, что снижает силу привода подачи, уменьшает различие сил при движении шпиндельной бабки вверх и вниз и повышает точность.

*Упругость* используется в механизмах зажима для реализации малых перемещений, для предохранения от поломок шариковых винтовых пар при наезде на препятствие и в других случаях. Упругость резцедержавки, обусловленную ослабленным сечением, используют для тонкого регулирования положения резца 3 (схема 5, а, табл. П.10.1). При вращении винта 1 происходит поворот образующегося «внутреннего» рычага в «шарнире» 2 (ослабленном сечении), вызывая микроперемещение вершины резца в соответствии с соотношением плеч  $A$  и  $B$  рычага. Упругость резиновых ковриков 4 (схема 5, б, табл. П.10.1), на которые устанавливается станок, уменьшает его собственную частоту колебаний (до 5...25 Гц), что способствует отстранению от внешних источников колебаний, имеющих существенно большие частоты.

*Силу тяжести* применяют для смазывания механизмов, например из общего бака, для перемещения деталей. В схеме 6, а (табл. П.10.1) для уменьшения сил в приводе подачи (аналогично гидростатическому эффекту) используют противовес 1 весом  $G$ . В схеме 6, б (табл. П.10.1) сила тяжести используется для подачи заготовок 2 в распределительное устройство 3. Теплопроводность материалов используют для улучшения отвода теплоты, для выравнивания температуры в различных частях конструкции и др. В конструкции шпиндельного узла с керамическим шпинделем 1 (схема 7, а, табл. П.10.1) смещение конца шпинделя вдоль оси существенно меньше (почти в 1,5 раза), чем при стальном шпинделе, имеющем значительно большую теплопроводность (и почти на 75 % больший коэффициент температурного линейного расширения). В схеме 7, б (табл. П.10.1) для уменьшения деформации шпиндельной бабки 2 от подвода теплоты от коробки передач 3 и двигателя 4 главного движения ее изолируют от коробки с помощью прокладок 5 с низкой теплопроводностью.

*Колебания* применяют в конструкциях для подачи штучных заготовок, транспортировки стружки и др. В схеме 8, а (табл. П.10.1) при создании режима работы сверла в условиях ультразвуковых продольных и крутильных колебаний (УЗК) существенно изменяются характеристики прочности и пластичности обрабатываемого материала, а следовательно, происходит улучшение условий резания и повышение производительности. В схеме 8, б (табл. П.10.1) для повышения

точности микроперемещений  $D$  узла  $1$  в нем в нормальном направлении возбуждают колебания определенной частоты, что изменяет характеристики трения. Известны и другие примеры использования колебаний. «Прослушивание» колебаний резонансной частоты позволяет, например, точно диагностировать «состояние» технической системы.

*Адаптивное управление* фрезерными станками основано на анализе колебаний шпиндельной бабки и сравнения их с допустимым уровнем. Объединение элементов с разными резонансными частотами может существенно улучшить динамические характеристики. Колебания используются для обнаружения трещин в металле, для измерения параметров объекта (массы, жесткости), для улучшения транспортирования изделий. Трение находит исключительно широкое применение для реализации различных функций механизмов. Сюда относятся зажимные и демпфирующие устройства, механизмы перемещений и др.

В схеме *9, а* (табл. П.10.1) трение между роликами  $1$  и  $3$  и штангой  $2$  обеспечивает ее перемещение. Подобная фрикционная передача часто используется для реализации сверхточных перемещений (долей микрометра). В схеме *9, б* (табл. П.10.1) хомут  $4$  удерживается на штанге  $5$  также силами трения. Трение используют для сварки (сварка трением), в предохранительных устройствах (самоторможение), для транспортирования деталей и т. п.

*Закономерности истечения* лежат в основе создания различных регуляторов, например, в гидро- и аэростатических опорах, демпфирования колебаний, «обезвешивания» узлов и т. п. Образование гидродинамической подъемной силы вращающегося вала  $1$  при затягивании масла в сужающийся зазор показано на схеме *10, а* (табл. П.10.1). Вследствие неразрывности слоя масла (закономерность истечения) в каждом сечении клинового зазора оно движется со своей скоростью (объем постоянен, а зазоры разные). Скорость движения масла в сечении обусловлена характером распределения давления  $p$  по зазору. Реализация малых перемещений в гидростатической опоре показана на схеме *10, б* (табл. П.10.1). Изменяя сопротивление дросселя  $2$  устройством  $3$ , обеспечивают перемещение  $A$  в пределах долей микрометра.

*Тепловое расширение* материалов применяют при разработке механизмов фиксации, для регулирования различных процессов, например, с помощью биметаллической пластинки, и т. п. В схеме *11, а*

(табл. П.10.1) тепловое расширение стержня 1 служит источником микроперемещений узла 2. Управление процессом улучшается при принудительном охлаждении стержня 1. В схеме 11, б (табл. П.10.1) тепловое расширение втулки 3, имеющей большой коэффициент температурного линейного расширения (например, выполненной из бронзы, эбонита), регулирует натяг в радиально-упорных подшипниках в зависимости от их нагревания. При увеличении температуры происходит изменение длины втулки 3 и уменьшение натяга.

*Давление–разрежение* применяют в механизмах зажима для реализации различных технологических процессов. В схеме 12, а (табл. П.10.1) давление жидкости (порядка 400 МПа), подводимой в сопло 1, используют для резки материала 2. Для повышения эффективности процесса жидкость на выходе из сопла захватывает частицы абразива, которые участвуют в резании. В схеме 12, б (табл. П.10.1) изделие 3 закрепляется вакуумными зажимами 4.

*Электромагнитные явления* широко используются в различных механизмах станков: от электродвигателей до тяговых устройств и зажимов. В схеме 13, а (табл. П.10.1) активных электромагнитных высокоскоростных шпиндельных опор, имеющих также хорошую несущую способность, вал 4 с пакетом электротехнического железа 1 удерживается в определенном положении с помощью магнитного поля, создаваемого электромагнитами 2 (обмотки показаны на двух магнитах), расположенными на статоре. Положение вала определяется с помощью специальных датчиков 3. При отклонении вала от заданного положения система управления по сигналу датчиков увеличивает силу тока в соответствующем электромагните, и вал возвращается в исходное положение.

Электромагнитная зубчатая муфта, с помощью которой происходит соединение зубчатого колеса 5 с валом 9, показана на схеме 13, б (табл. П.10.1). При включении муфты происходит перемещение якоря 6 вдоль оси и взаимодействие зубьев 7 и 8 зубчатой муфты.

*Ферромагнитные частицы*, передвигаясь под действием магнитного поля, способны полировать поверхность (очищать от окалин и загрязнителей). Введение ферромагнитных частиц внутрь детали позволяет управлять деформациями, повысить ее прочность (изготовление литейных форм) и др.

В схеме 14, а (табл. П.10.1) ферромагнитные частицы, заполняющие объем между подвижными 1 и неподвижными 2 дисками по-

рошкового тормоза, позволяют изменять момент в зависимости от подводимого напряжения. Ферромагнитные частицы, введенные в жидкость, образуют магнитную жидкость, которую можно использовать для повышения демпфирования (вязкость изменяется в зависимости от магнитного поля), герметизации зазоров и т. п.

*Магнитопорошковые материалы* с магнитной фазой на базе оксидов железа и смазывающей компонентой на основе дисульфида молибдена (магнитная псевдожидкость) могут использоваться для герметизации гидроцилиндров (схема 14, б, табл. П.10.1). Магнитоактивный герметизатор 3 удерживается между валом 4 и полюсным наконечником 5 кольцеобразным постоянным магнитом 6.

*Магнитные жидкости*, в которые добавляются абразивные частицы, способны обрабатывать поверхности, их можно использовать для зажима деталей (при пропускании тока жидкость твердеет).

*Магнитострикция, пьезоэффект*. При изменении магнитного поля (магнитострикция) или напряжения (пьезоэффект) происходит изменение размеров. В схеме 15, а (табл. П.10.1) магнитострикционный эффект реализован в приводе микроперемещений (на величину  $D$ ) узла 1. В схеме 15, б (табл. П.10.1) пьезоэффект применен для улучшения эксплуатационных характеристик опоры скольжения в период пуска. Втулка 2 подшипника выполнена из пьезоматериала, изменение напряжения в которой вызывает ультразвуковые колебания слоев, устраняющие трение покоя. Пьезоэффект используется также для изменения силы, давления, в вибраторах и в других случаях.

*Закон Гука*, согласно которому деформации в материале пропорциональны напряжению, реализуется, например, при микроперемещениях. В схеме 16, а (табл. П.10.1) для перемещения на величину  $A$  применен эффект поперечного сжатия силой  $F$ . В схеме 16, б (табл. П.10.1) перемещение узла 1 может осуществляться импульсами на достаточно большую длину. Для этого включают левый тормоз  $L$ , подают давление в гидроцилиндр 2 и после деформации стержня 3 включают правый тормоз  $П$  и отпускают левый (осуществляют перехват). Для дальнейшего перемещения узла 1 цикл работы повторяется.

*Тензометрия, удар*. Тензометрические устройства, основанные на принципе изменения сопротивления при деформации чувствительного элемента, наклеенного на конструкцию, применяют для контроля деформации, силы и в других случаях.

В схеме 17, а (табл. П.10.1) тензометрические механизмы служат для адаптивного управления режимами резания круглошлифовального

станка. Тензодатчик  $1$  наклеен на центрах  $2$  станка, поддерживающих заготовку (второй центр не показан). Измеряя с помощью тензодатчиков нормальную силу шлифования и поддерживая ее на определенном уровне, повышают качество обработки. Идея использования удара для гашения колебаний представлена на схеме  $17, б$  (табл. П.10.1). Основу гасителя составляет тело массой  $m$ , соударяющееся с элементом  $1$  демпфируемой системы, колебание которого требуется уменьшить.

*Фазовые и псевдофазовые превращения.* В схеме  $18, а$  (табл. П.10.1) зажимного приспособления (например, для корпусных деталей) на основе сред с псевдофазовыми превращениями в контейнер  $2$ , наполненный шариками (макрочастицами), через пористое основание  $1$  с определенной скоростью поступает воздух. При подаче воздуха макрочастицы ведут себя как жидкотекучая среда, что позволяет легко установить деталь  $3$  на глубину  $H$ . После прекращения подачи воздуха макрочастицы образуют твердую массу, удерживающую деталь. В схеме  $18, б$  (табл. П.10.1) применен сухой лед  $1$  в замкнутом объеме, повышающий давление на величину  $\Delta p$  при испарении. Увеличение объема происходит при застывании висмута, что также может быть использовано для создания неразъемного соединения. Примораживание используется для закрепления деталей.

*Лазер* широко применяют для резки материалов, закаливания поверхностей, проведения высокоточных измерений. На схеме  $19$  (табл. П.10.1) показано измерение деформации на величину  $D$  ползуна  $1$  продольно-обрабатывающего станка от силы резания с последующей ее компенсацией. Лазер  $2$  посылает в измерительное устройство  $3$  луч, параллельный оси ползуна. Измерительное устройство (показано внизу) состоит из цилиндрического зеркала  $4$ , от которого отражается проходящий луч, попадающий на фотодиоды  $5$ , которые определяют смещение ползуна. Сигнал используется в дальнейшем для управления частотой вращения, насосов, питающих карманы гидростатических опор ползуна, благодаря чему толщина масляной пленки в опорах зависит от величины деформации и происходит ее компенсация.

*Капилляр.* Способность впитывать жидкость – одно из основных свойств капиллярно-пористых материалов (схема  $20, а$ , табл. П.10.1). Если жидкость смачивает стенки капилляра, то она поднимается на высоту  $H$ , которая зависит от размера капилляра, поверхностного натяжения и плотности жидкости. Это свойство может быть использовано для смазывания (фитильная смазка, пористый подшипник).

Кроме того, пористый материал может служить в качестве звукопоглощающей облицовки, для температурной изоляции и т. п.

*Эффект струны* (схема 20, б, табл. П.10.1) можно использовать для замера точности перемещений узлов в вертикальной плоскости. Узел 1 перемещается по направляющим и измеряется расстояние  $l_1$  и  $l_2$  и т. д. до струны 2. По подобному принципу работает электронный уровень, при перекосе корпуса которого изменяется расстояние между подвешенным на струне шариком и датчиками положения.

*Эффект «память формы»* – это восстановление исходной формы после деформирования (обратимость больших неупругих деформаций). Носителями этого эффекта могут быть сплавы TiNi, Cu-Al-Ti, сталь 12X18H10T. Материал может находиться в двух устойчивых состояниях: в исходной и мартенситной фазах. При температуре выше температуры начала обратного мартенситного превращения происходит деформация материала. На рис. П.10.1 показаны примеры возможного использования этого эффекта: на рис. П.10.1, а – положение заклепки в исходном положении I и при нагреве до температуры, при которой происходит деформация (положение II), а на рис. П.10.1, б – несварного соединения деталей в исходном положении I когда между деталями имеется зазор  $D$ , который ликвидируется и переходит в натяг после нагрева деталей (положение II).

*Избирательный перенос при трении* – это перенос меди в парах трения на сталь и обратный ее перенос со стали на медный сплав при определенных сочетаниях температуры, давления и скорости скольжения. Процесс сопровождается снижением коэффициента трения и резким повышением износостойкости. Например, для пары сталь 30ХТСа – бронза БРАЖМц 10-3-1,5 интенсивность изнашивания (износ, отнесенный к пути трения) составляет  $0,9 \cdot 10^{-8}$ .

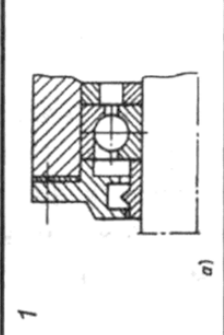
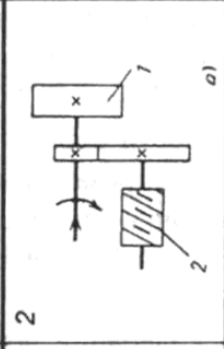
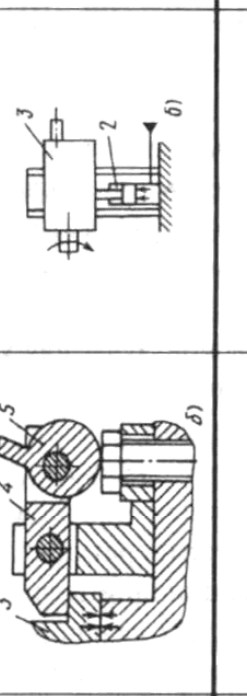
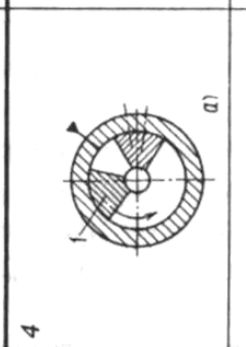
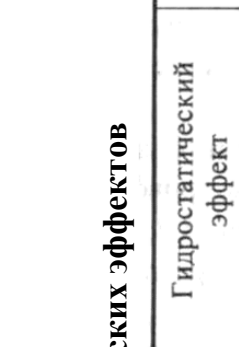
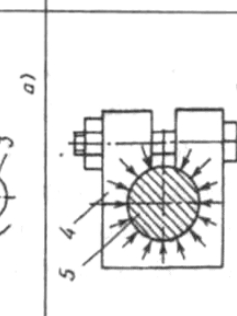
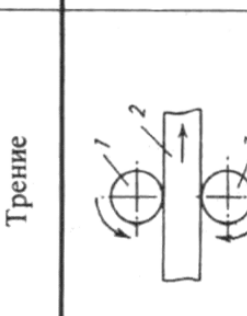
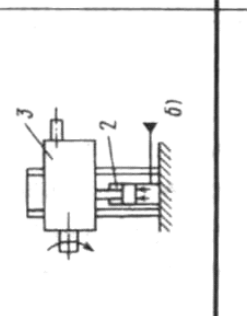
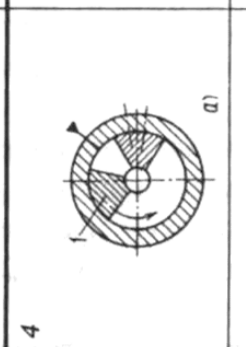
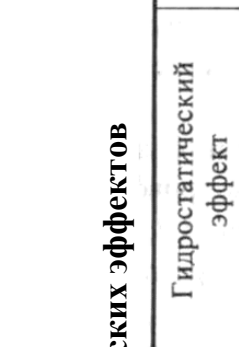
*Внутреннее трение.* Для твердых тел – это свойство превращать в теплоту механическую энергию в процессе их деформирования. Используется для снижения уровня вибраций. Для масла мерой внутреннего трения является вязкость.

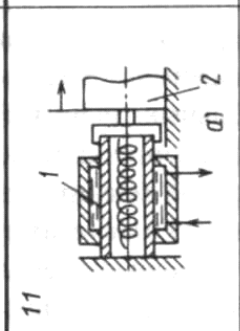
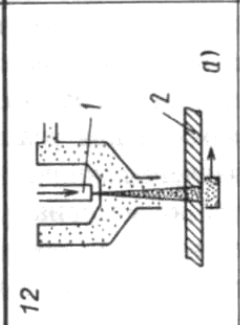
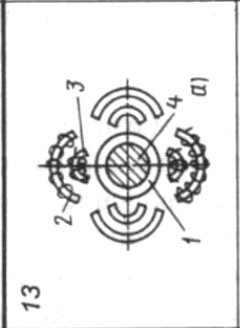
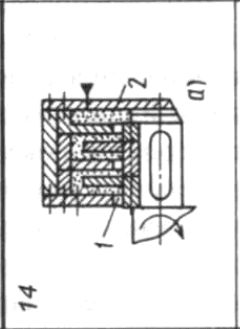
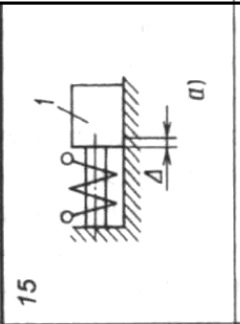
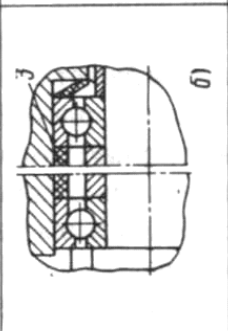
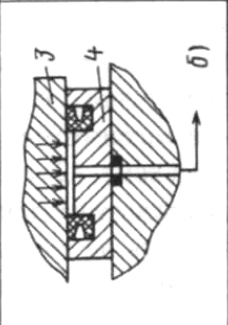
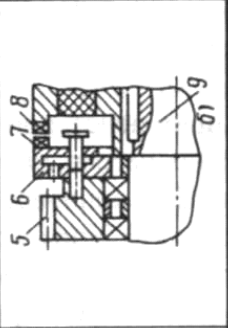
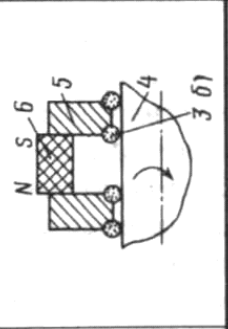
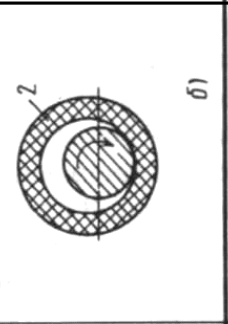
*Ультразвуковое диспергирование* – тонкое размельчение (размер частиц до 1 мкм) твердых веществ под действием УЗК, применяемое в химической промышленности, а также для размельчения частиц в смазочных материалах.

*Дельта E-эффект* – изменение модуля упругости ферромагнитных веществ в зависимости от их намагниченности.



Использование различных физико-технических эффектов

<p>Центробежные силы</p> 	<p>Инерция</p> 	<p>Рычаг, клин, эксцентрик</p> 	<p>Гидростатический эффект</p> 	<p>Упругость</p> 
<p>Тяжесть</p> 	<p>Теплопроводность</p> 	<p>Колебания</p> 	<p>Трение</p> 	<p>Закономерности истечения</p> 

<p>11</p> <p>Тепловое расширение</p> 	<p>12</p> <p>Давление – разрезание</p> 	<p>13</p> <p>Электромагнетизм</p> 	<p>14</p> <p>Ферромагнитные частицы</p> 	<p>15</p> <p>Магнитострикция, пьезоэффект</p> 
<p>16</p> <p>Закон Гука</p> 	<p>17</p> <p>Тензометрия, удар</p> 	<p>18</p> <p>Фазовые превращения</p> 	<p>19</p> <p>Лазер</p> 	<p>20</p> <p>Капилляр, струна</p> 

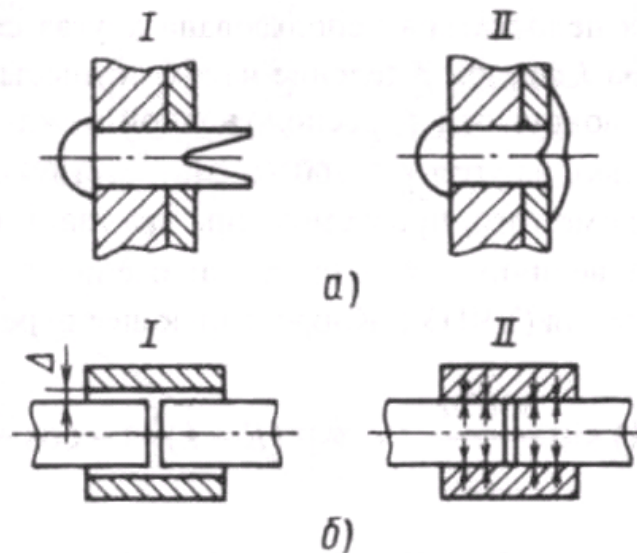


Рис. П.10.1. Эскизы соединений

## ПРИЛОЖЕНИЕ 11

### Пример применения метода генерирования гирлянд ассоциаций и метафор

Изложение для наглядности приводится на примере поиска новых конструктивных решений стульев для расширения ассортимента мебельной фабрики. Модификация метода включает последовательное выполнение ряда шагов – операций обработки информации.

Шаг 1 – определение синонимов объекта. Синонимами объекта «стул» являются кресло, табурет, пуф. Составляем гирлянду синонимов: стул – кресло – табурет – пуф.

Шаг 2 – произвольный выбор случайных объектов. Совершенно случайно (по памяти или из энциклопедического словаря или любым другим способом) выбирают несколько имен существительных, которые даже не обязательно должны обозначать технические объекты. Отобранные слова образуют вторую цепочку – гирлянду случайных объектов, например: электролампочка – решетка – карман – кольцо – цветок – пляж.

Шаг 3 – составление комбинаций из элементов гирлянды синонимов и гирлянды случайных объектов. Составляют комбинацию из двух элементов, соединив каждый синоним рассматриваемого объекта с каждым случайным объектом. Получают: стул с электролампочкой, решетчатый стул, стул с карманами, стул для пляжа, электрическое кресло, табурет для цветов и т. д.

Шаг 4 – составление перечня признаков случайных объектов. Определяют признаки случайно выбранных объектов. Необходимо определить как можно больше признаков, однако в течение ограниченного времени, например двух-трех минут. Успех поисков в значительной мере зависит от широты охвата признаков случайных объектов, поэтому целесообразно перечислять как основные, так и второстепенные, малозначительные признаки. Для удобства можно составить таблицу (табл. П.11.1).

Шаг 5 – генерирование идей путем поочередного присоединения к техническому объекту и его синонимам признаков случайно выбранных объектов. Например, присоединяя к гирлянде синонимов стул – кресло – табурет – пуф гирлянды признаков электролампочки, можно получить следующие соединения: стеклянный стул, теплоизлучающее кресло, колбообразный пуф, прозрачное кресло, стул с электроконтактами и т. д.

Таблица П.11.1

#### Перечень признаков

Наименование объекта	Признаки
Электролампочка	Стеклянная, свето- и теплоизлучающая, колбообразная, прозрачная, с цоколем, с электроконтактами, матовая, цветная
Решетка	Металлическая, пластмассовая, плетеная, сварная, кованая, гибкая, жесткая, крупная, мелкая, с одинаковыми и неодинаковыми ячейками
Карман	Передний, боковой, задний, наружный, внутренний, накладной, ложный, с молнией
Кольцо	Металлическое, деревянное, пластмассовое, витое, сплошное, надувное, эмалированное, с гальваническим покрытием, гербом, орнаментом, драгоценными камнями, часами, встроенным радиоприемником
Цветок	Одноцветный, многоцветный, душистый, колоколообразный, пятнистый, поворачивающийся к солнцу, самораскрывающийся, полевой, осенний, водяной, садовый, балконный, с шипами, симметричный
Пляж	Морской, речной, солнечный, песчаный, галечный, гладкий, бугристый, узкий, длинный

Аналогично образуется перечень новых конструкций, получаемых путем поочередного присоединения к гирлянде синонимов признаков других случайных объектов – электролампочки, решетки, кармана, кольца, цветка и пляжа.

Шаг 6 – генерирование гирлянд ассоциаций. Поочередно из признаков случайных объектов, выявленных на 4-м шаге, генерируются гирлянды свободных ассоциаций. Для каждого отдельного признака они могут быть практически неограниченной длины, поэтому генерирование следует ограничить по времени или по количеству элементов гирлянды. Если работа осуществляется коллективно, то каждый член коллектива выполняет 6-й шаг самостоятельно. Практика показывает, что гирлянды ассоциаций никогда не совпадают, хотя первые элементы иногда и бывают одинаковыми.

Рассмотрим, например, генерирование гирлянды ассоциаций по первому признаку случайного объекта «электролампочка». Этим признаком является эпитет «стеклянная». Гирлянда ассоциаций создается постановкой вопроса: «Что напоминает слово «стеклянная»? Ответ может быть, например, такой: стеклянное волокно. Далее, задается вопрос: что напоминает слово «волокно»? Кому-нибудь это может напомнить: плетение, вязание. Аналогично, продолжая поиск элементов гирлянды ассоциаций, можно увеличить длину гирлянды. Вязание может напомнить бабушку, лечущую ревматизм на курортах юга, где от жары можно укрыться в тени или под зонтиком, напоминающим крышу садовой беседки, под которой отдыхают в летние солнечные дни. Солнце может напомнить эллиптические орбиты, по которым движутся планеты и летают космонавты, которых так любят дети, и т. д.

Гирлянда ассоциаций в этом случае будет выглядеть следующим образом: стекло – волокно – вязание – бабушка – ревматизм – курорт – юг – жара – тень – зонтик – садовая беседка – солнце – эллипс – орбита – планета – космонавт – дети. Аналогично создается гирлянда ассоциаций по всем другим признакам электролампочки. Затем генерируются гирлянды ассоциаций по всем признакам других объектов, перечисленных в таблице. Количество элементов всех гирлянд может быть очень большим.

Шаг 7 – генерирование новых идей. К элементам гирлянды синонимов технического объекта поочередно пытаются присоединить элементы гирлянд ассоциаций. Например, используя только первую гирлянду ассоциаций, можно получить следующие сочетания: стеклянный стул, кресло из стекловолокна, вязанный пуф, табурет для бабушки, кресло для лечения ревматизма, курортное кресло, кресло от жары и т. д. На этом шаге решается вопрос, есть ли среди сочетаний синонимов технического объекта с элементами гирлянд ассоциаций достаточное количество оригинальных и заманчивых идей. Если по

предварительной оценке таких идей мало, можно продолжить создание гирлянд ассоциаций, начиная с какого-нибудь нового элемента гирлянд, созданных на 6-м шаге, действуя подобным же образом.

Шаг 8 – оценка и выбор рациональных вариантов идей. Генерирование новых вариантов решения задачи на предыдущих шагах, как правило, дает достаточно большое число вариантов. Среди множества нерациональных, тривиальных и даже нелепых идей всегда найдутся оригинальные и рациональные. Если в течение короткого времени можно найти тысячи вариантов решения, то нас вполне удовлетворит положение, при котором хотя бы несколько вариантов будут рациональными. Количество рациональных вариантов обратно пропорционально их оригинальности. Это свидетельствует о том, что высокий процент рациональных вариантов решений нельзя считать положительным явлением. Наилучшие результаты достигались при 10–15 % интересных идей. Отбор вариантов рекомендуется производить в несколько этапов. Сначала вычеркивают явно нерациональные варианты. Затем отбирают наиболее оригинальные варианты сомнительной полезности, но привлекающие своей неожиданностью. На первый взгляд, они кажутся бесполезными или малоперспективными в смысле удовлетворения актуальных общественных потребностей. Список таких вариантов целесообразно изучить с привлечением экспертов или творческого коллектива. В список рациональных решений включают варианты, наилучшим образом отвечающие поставленным целям и требованиям производства.

Шаг 9 – отбор наилучшего варианта из рациональных осуществляется разными способами. Весьма простым и эффективным является метод экспертных оценок. В состав группы экспертов следует включить конструкторов, технологов, экономистов, психологов, дизайнеров, коммерческих работников, представителей торговли и потребителей, а в ряде случаев и других специалистов – в области моды, стандартизации, информатики и т. д.

В данном примере найденные разнообразные по существу идеи могут быть классифицированы:

- по функциональному назначению объекта (кресло для лечения ревматизма, кресло для загорания и т. д.);
- конструкции объекта (кресло с зонтиком, кресло со встроенным радиоприемником и т. д.);
- технологии изготовления объекта (плетеное кресло, эмалированный стул и т. п.);

- материалу (стеклянный стул, пластмассовое кресло и т. п.);
- форме объекта (чашеобразное кресло, эллипсообразный стул и т. п.);
- принципу действия (передвижной стул, катапультируемое кресло);
- внешнему виду и оформлению (прозрачное кресло, разноцветный пуф и т. п.).

Идеи, классифицированные подобным образом, иногда целесообразно комбинировать, чтобы конкретизировать идею создания нового объекта. Так, можно получить идеи создания чашеобразного теплоизлучающего перфорированного металлического передвижного кресла для лечения ревматизма; эллипсообразного пластмассового кресла с зонтиком (для пляжа), со встроенными часами и радиоприемником и т. д. При сочетании идей следует учесть, что нельзя ограничиваться механическим поиском комбинаций: любой из признаков легко можно заменить другим, более подходящим для конкретных условий. Замена подлежат в первую очередь признаки, целесообразность использования которых при заданных условиях вызывает сомнение. В некоторых случаях необходимо выбрать не одно наилучшее, а небольшое количество (два-три) конкурирующих решений для предварительной разработки, по итогам которой принимается окончательное решение.

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Михайлов Михаил Иванович**

# **ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**Учебное пособие**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *А. В. Власов*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 29.12.17.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 23,48. Уч.-изд. л. 25,08.

Изд. № 20.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель