

## Проектные процедуры и задачи

### *Проектные процедуры и операции*

Множество действий, которые выполняются при проектировании, группируют в блоки, называемые по степени их укрупненности, проектными операциями, процедурами и задачами. Проектная операция – блок элементарных действий, объединенных всего лишь одним результатом, используемый в дальнейшем. Примерами проектных операций являются вычисление силы линзы, расчет луча через поверхность, вычерчивание контура детали, ввод исходных данных в компьютер и так далее. Проектная процедура – это совокупность операций, выполняемых проектировщиком или компьютером непрерывно и последовательно. Примерами проектных процедур могут служить расчет aberrаций оптической системы, вычисление оптических передаточных характеристик и так далее. Процедуры и операции отличаются друг от друга не только содержанием, но и такими свойствами, как детерминированность, эвристичность, трудоемкость, объектно-ориентированность, объектно-инвариантность.

Полностью детерминированной называется такая процедура или операция, которая сводится к выполнению определенного алгоритма, то есть совокупности правил, предписаний, программ. К числу подобных процедур относятся расчет хода лучей, вычисление aberrаций оптических систем, построение проекции какого-либо тела на плоскость, поиск в архиве объекта с заданными характеристиками и так далее. Детерминированные процедуры и операции характерны тем, что при аккуратном и точном следовании предписанному алгоритму, результат их выполнения будет всегда одинаковым, независимо от опыта, знаний, способности и квалификации исполнителя. Последние определяют только скорость выполнения процедуры. Идеальным исполнителем таких процедур является компьютер: он не делает ошибок и строго следует заложенной в него программе.

В противоположность детерминированным для полностью эвристических процедур или операций невозможно или чрезвычайно сложно составить сколько-нибудь однозначный алгоритм выполнения. Поэтому такие процедуры выполняются только человеком, ибо только он способен действовать в отсутствие четкого алгоритма и полной исходной информации. Результат выполнения эвристических процедур определяется знаниями, опытом, способностями и квалификацией исполнителя. Для эвристических процедур характерно повышение эффективности их выполнения по мере обучения исполнителя. Примерами эвристических процедур могут служить оценка результатов синтеза, оптимизации и принятие решений о дальнейшем ходе проектирования, составление задания на оптимизацию.

Попытки алгоритмизировать эвристические процедуры и поручить их выполнение компьютеру из-за недостаточных знаний закономерностей работы мозга человека пока что к успеху не привели. Продвижение в этом направлении

связано с применением компьютерных экспертных систем и средств искусственного интеллекта. В них аккумулируется эвристический опыт квалифицированных проектировщиков в конкретных областях.

**Трудоемкость** выполнения процедур и операций определяется требуемыми затратами ресурсов. Для компьютера – это количество вычислений и объем памяти. Например, расчет хода параксиальных лучей через оптические системы требует всего нескольких арифметических операций на каждую поверхность и выполняется компьютером практически мгновенно. Но такая процедура, как моделирование преобразования сигнала методом частотного анализа с учетом погрешностей оптики, когерентности освещения, формы зрачка и так далее, может потребовать на том же компьютере до нескольких десятков минут времени и солидных ресурсов памяти. В первом случае говорят о ничтожно малой трудоемкости, во втором – о значительной.

**Объектно-ориентированность** какой-либо процедуры или операции определяется степенью зависимости применяемых методов, математического аппарата, алгоритмов от специфики проектируемого объекта. Например, аппарат расчета хода лучей, применяемый при проектировании оптических систем, совершенно не подходит для расчетов электронных или кинематических схем, конструирования оправ линз, но он одинаков для всех оптических систем. Говорят, что процедура анализа оптических систем путем расчета хода лучей отличается средней степенью объектной ориентированности. Примером процедуры, объектно-ориентированной в высшей степени, может служить синтез зеркально-линзового объектива оптического прибора. Аппарат этого синтеза не только является специфическим для оптических систем вообще, но пригоден только для оптических систем данного типа, а именно зеркально-линзовых объективов. С другой стороны, достаточно универсальными являются методы поиска прототипа в базе данных, математический аппарат оптимизации. Их содержание и алгоритмы не зависят от того, какой объект оптимизируется или ищется в архиве: оптическая система или электронный блок, зубчатое зацепление или кулачок. О таких универсальных процедурах говорят, что они полностью **объектно-инвариантны**.

Как будет показано в дальнейшем, определение степени эвристичности и детерминированности, объектно-ориентированности и объектно-инвариантности, а также трудоемкости отдельных процедур и операций, позволяет в казалось бы непрерывном и неупорядочном процессе проектирования безошибочно отделить выполняемые действия друг от друга, наиболее рационально использовать компьютерные средства. В частности, необходимо четко отделить все эвристические процедуры и обеспечить их выполнение человеком-проектировщиком. На компьютер же необходимо возложить выполнение всех детерминированных процедур и, в первую очередь, наиболее трудоемких. Для выполнения эвристических процедур проектировщику должна быть предоставлена из компьютера вся необходимая информация, причем в наиболее наглядной и доступной форме, как правило, в графической. Что касается объектно-ориентированности, то в первую очередь

необходимо вычленять максимально объектно-инвариантные процедуры и их части – операции. Как было отмечено выше, такие процедуры и операции используют универсальные алгоритмы и методы, хорошо развитые и тщательно отработанные в настоящее время множеством авторов для самых различных применений. Пакеты компьютерных программ, реализующие универсальные, объектно-инвариантные операции и процедуры проектирования, являются наиболее массовыми, широко известными и, в силу своей массовости, сравнительно недорогими.

## 4.2 Проектирование – как обратная задача

Каким бы сложным ни был проект, конструкция и технология изготовления любого прибора могут быть описаны конечным числом значений некоторых параметров, численным образом представляющих конструкцию и материалы отдельных частей прибора, их взаимное расположение, особенности технологии, допуски на изготовление и другие. Например, оптическая система, или оптическая схема, прибора однозначно описывается совокупностью конструктивных параметров (значений радиусов кривизны поверхностей, марок стекол или значениями их показателей преломления, осевыми расстояниями между поверхностями, световыми диаметрами). Если эти данные известны, то любое квалифицированное производство может изготовить заданную оптическую систему однозначно. Поэтому с математической точки зрения проект есть совокупность значений упорядоченных параметров. Обозначим эти параметры  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , причем число этих параметров  $n$  может быть крайне велико. Удобно объединить их в один  $n$ -мерный вектор, или столбец параметров  $\mathbf{x}$ :

$$\mathbf{x}^T = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

где  $T$  – индекс операции транспонирования. Понятно, что изменение вектора  $\mathbf{x}$  приводит к изменению конструкции прибора.

Аналогично, выразим все характеристики прибора совокупностью чисел  $f_i$ ,  $i = 1, \dots, m$  и объединим их в  $m$ -мерный вектор характеристик:

$$\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (4.2)$$

Очевидно, последний и составляет содержание технического задания. Процесс проектирования в таком случае решает задачу перехода от известных заданных значений элементов вектора  $\mathbf{f}$  к неизвестным (определяемым в процессе проектирования) значениям элементов вектора  $\mathbf{x}$ .

Предположим, что в результате проектирования найден вектор  $\mathbf{x}$  и что изготовлен прибор соответствующий этому вектору. Этот прибор обладает определенными характеристиками, то есть соответствует конкретному вектору  $\mathbf{f}$ . Если изменить вектор  $\mathbf{x}$  и изготовить прибор, соответствующий этому новому вектору, то это будет другой прибор, с другими значениями характеристик. Это означает, что вектор характеристик  $\mathbf{f}$  является функцией вектора параметров  $\mathbf{x}$ . Так как процесс изготовления прибора по известному вектору  $\mathbf{x}$  предполагается однозначным (в пределах допусков), то и

функциональная зависимость  $f$  от  $x$  является вполне определенной и однозначной. Следовательно, можно записать:

$$f = f(x) \quad (4.3)$$

Эту зависимость физически реализует процесс изготовления, испытания и эксплуатации прибора. В этом смысле он является **прямым** процессом. Если построена достаточно хорошая математическая (компьютерная) модель прибора, то для определения вектора  $f$  воспроизводить прибор по известному вектору  $x$  совсем не обязательно: процесс производства и испытания прибора логично заменить математическим (компьютерным) моделированием. По отношению к производству, испытанию и эксплуатации оно решает прямую задачу.

Задача же проектирования, то есть задача нахождения значений параметров, обеспечивающих заданные характеристики прибора, является **обратной**. Для обратных задач вообще и, для проектирования, в частности, характерны, в отличие от прямых, неоднозначность их решения, отсутствие простых методов решения, а иногда и вообще проблематичность существования самого решения. Прямая задача разрешима всегда, то есть по любому проекту можно изготовить прибор, и он будет иметь определенные значения характеристик (хотя, вполне вероятно, не устраивающие проектировщика). Но далеко не по любому техническому заданию, то есть по любому набору значений характеристик, можно спроектировать прибор, удовлетворяющий ему. Даже если прибор можно спроектировать, то вполне вероятно, что возможен не единственный вариант.

Задача проектирования состоит в решении обратной задачи, когда по полному вектору заданных в ТЗ характеристик  $f$  определяется окончательный вектор параметров  $x$ . Это решение практически никогда не может быть получено по прямому пути.

Все процедуры, выполняемые на любом уровне и любой ветви проектирования, по цели выполнения объединяются в три группы: синтеза, анализа и оптимизации. Задача **синтеза** состоит в первоначальном создании по техническому заданию объекта проектирования. Задачи **анализа** сводятся к моделированию работы этого объекта и определения его характеристик. Задачи **оптимизации** заключаются в целенаправленном изменении параметров объекта, чтобы его характеристики стали оптимальными, то есть наилучшим образом удовлетворяли ТЗ. Окончательное решение получается путем сложного итерационного процесса, включающего синтез, анализ, оптимизацию и повтор этих процедур.

Таким образом, проектирование как обратная задача характеризуется неоднозначностью решений, необходимостью выбора варианта из большого количества возможных решений, отсутствием определенного алгоритма решения. Другими словами, проектирование является творческим, эвристическим процессом. Сложность конструкций оптических приборов, наличие в них физически разнородных частей и устройств (оптических систем, электронных блоков, механических устройств и так далее), большого

количества разнообразных деталей и элементов, находящихся во взаимосвязи, создают в проектировании оптических приборов дополнительные проблемы. Даже очень талантливый проектировщик не в состоянии охватить проект в целом, удерживая при проектировании в своем внимании всю конструкцию прибора, все его системы и детали одновременно. Поэтому проектирование ведется коллективом с использованием специальных методов и средств.

### 4.3 Синтез

Задача синтеза заключается в создании первоначального описания объекта проектирования по техническому заданию (на данном уровне данной ветви). Формально она сводится к определению неизвестного вектора параметров  $\mathbf{x}$  по заданному вектору характеристик  $\mathbf{f}$ .



Рис.4.1. Синтез

Под  $\mathbf{x}_{start}$  понимается начальное решение, представляющее набор значений параметров, который является крайне приближенным и наверняка не удовлетворяет большинству требований технического задания. Существенное отличие задачи синтеза – гарантированная реализуемость решения. Это решение называют **стартовой точкой**. Вектор характеристик  $\mathbf{f}$  при синтезе не является полным и не полностью соответствует исходному техническому заданию: он может включать лишь основные требования, у которых допустимые интервалы могут быть расширены. Можно сказать, что сущность задачи синтеза состоит в получении наиболее простыми средствами начального приближения, принимаемого за исходную, стартовую точку для последующей оптимизаций.

Задача синтеза отличается крайней эвристичностью. Особенно это относится к структурному синтезу. Задача синтеза обладает также явно выраженной объектной ориентированностью, поскольку бесспорно, что методы синтеза не только оптических или электронных схем, но даже разных оптических схем, совершенно различны. Из-за высокой степени эвристичности синтез (особенно структурный) в значительной своей части выполняется непосредственно проектировщиком. Тем более, что для опытного проектировщика синтез путем правильного выбора из типовых структур с возможной их модификацией является сравнительно нетрудоемкой, хотя и эвристической задачей. Синтез принципиально новой, ранее неизвестной структуры является весьма редким и относится к числу трудных изобретательских задач, выполняемых лишь опытными, талантливыми проектировщиками.

Различают два этапа синтеза – структурный и параметрический. На первом этапе определяется структура проектируемого объекта, то есть количество и

типы элементов, последовательность расположения и связи между ними; на втором – определяются численные значения параметров этой структуры. Так, при **структурном синтезе** оптических систем определяют из скольких линз будет состоять проектируемый объектив, будет ли он зеркальным, линзовым или зеркально-линзовым, сколько будет в нем зеркал или линз, из каких марок стекла будут линзы, какого они будут типа и так далее. Например, при структурном синтезе может быть принято, что объектив будет простейшим типом линзового объектива – так называемым склеенным дублетом, состоящим из склеенных положительной и отрицательной линз, причем положительная выполнена из стекла группы кронов, а отрицательная – флинт. При структурном синтезе механизмов определяются типы проектируемых механизмов и их элементов, виды связей между ними. При синтезе электронных схем – типы элементов, входящих в схему, (резисторов, конденсаторов, транзисторов) и их соединения.

После структурного синтеза следует **параметрический**, в процессе которого определяются численные значения параметров синтезированной структуры. Так, для склеенного дублета определяются значения трех радиусов кривизны, двух толщин линз и конкретные марки стекол. Для электронных схем при параметрическом синтезе определяются значения сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов, параметры транзисторов, для кулачкового механизма – коэффициенты уравнения профиля кулачка, для четырехзвенного механизма – длины его звеньев и так далее. Параметрический синтез, как правило, производится с использованием приближенных формул, своих для каждой типовой структуры. Такие приближенные формулы обычно имеются в справочной литературе и могут быть легко запрограммированы для компьютера.

Весьма распространенным методом синтеза является синтез путем поиска прототипа в базе данных готовых решений и предыдущих проектов. Этот метод характеризуется высокой детерминированностью и универсальностью. В базе данных хранятся описания уже готовых объектов, взятые из различных источников, в том числе патентной литературы. Проектировщик составляет задание на поиск, содержащее набор характеристик, которым должен удовлетворять искомый объект. А система управления базой данных осуществляет поиск объекта, удовлетворяющего этому запросу. Возможны два варианта поисковых предписаний и методов поиска. Первый – это **интервальное предписание**, при котором для каждой характеристики задается интервал приемлемых значений. В этом случае одному поисковому предписанию может соответствовать несколько объектов, из которых проектировщик впоследствии выбирает один либо сужая интервалы в поисковом предписании, либо делая эвристический выбор. При этом может не найтись и ни одного объекта. Тогда проектировщик должен расширить допустимые интервалы поискового предписания. Второй вариант – это **критериальное предписание**, при котором характеристики ближайшего объекта должны быть по какому-либо критерию ближе всего к поисковому предписанию. Например, в соответствии со среднеквадратическим критерием,

ищется объект, у которого минимальна сумма квадратов разностей соответствующих характеристик объекта и поискового предписания, деленных на заданные масштабы. При использовании критериального предписания всегда будет найден один и только один объект, удовлетворяющий заданным условиям поиска. Использование СУБД является наиболее простым и удобным методом синтеза, вполне детерминированным и совершенно универсальным. При этом СУБД одновременно решает задачу как структурного, так и параметрического синтеза. Единственным, но весьма крупным недостатком этого метода, является то, что он принципиально не может дать нового решения, а только использует уже существующие. Для частичного устранения этого недостатка применяют модификацию найденного в архиве решения. Модификация может заключаться в добавлении новых элементов, масштабировании всего объекта или частей, замене некоторых элементов и так далее. Разумеется, модификация отличается высокой степенью эвристичности и выполняется достаточно опытным проектировщиком.

Для построения алгоритма проектирования представим структурную схему синтеза следующим образом (Рис. 4.2.):



Рис.4.2. Структурная схема синтеза

Процедура “Задание на синтез”, является эвристической и выполняется человеком-проектировщиком. Процедура “Синтез” является детерминированной и выполняется компьютером (или проектировщиком, но по четким алгоритмам и формулам). Конкретное содержание этих процедур зависит, конечно, от проектируемого объекта и от выбранного метода синтеза. При поиске прототипов в архиве процедура “Задание на синтез” состоит в

составлении поискового предписания, а процедура “Собственно синтез” – в поиске объекта в соответствии с этим предписанием. При выборе одного из типовых решений параметрического синтеза по приближенным эмпирическим соотношениям в эвристическую процедуру “Задание на синтез” входят собственно структурный синтез и определение значений исходных данных, выполняемых проектировщиком “в уме”. В этом случае детерминированная процедура “Собственно синтез” сводится к производству вычислений по формулам параметрического синтеза. Процедура “Оценка результатов”, так же, как и первая процедура, является эвристической и выполняется проектировщиком. В случае явно неудачного результата производится возврат на этап формулировки нового задания на синтез. Такой возврат имеет также место, в случае, когда после поиска прототипа требуется его модификация, для которой необходим следующий цикл синтеза. Если на этом этапе результат синтеза признается удачным, то осуществляется переход к анализу.

#### 4.4 Анализ

Анализ по своей сути представляет моделирование работы проектируемого на данном уровне объекта с целью определения его характеристик. В большинстве случаев анализ реализуется в настоящее время как математическое, компьютерное моделирование. В некоторых случаях применяется макетирование (изготовление проектируемого объекта).



Рис. 4.3. Анализ

Характерной особенностью анализа является наличие нескольких (иногда довольно большого) числа уровней, отличающихся глубиной и полнотой анализа и его трудоемкостью. На начальных уровнях определяется сравнительно небольшое количество основных характеристик. Это требует минимального количества вычислений. Поэтому эти уровни характеризуются малой трудоемкостью. На следующих, более глубоких уровнях, анализируется намного большее число характеристик. Это требует возрастающего объема вычислений, причем трудоемкость различных уровней анализа может отличаться в десятки и даже сотни раз. Например, при анализе оптических систем начальный уровень относится к определению так называемых параксиальных характеристик, таких как фокусное расстояние, увеличение, положение изображения и характеризуется ничтожной трудоемкостью. Следующий уровень заключается в расчете хода реальных лучей и вычисления их аберраций. Объем этих вычислений в десятки раз больше. Вслед за ними обычно идет уровень вычисления так называемых передаточных характеристик, определяющих качество оптического изображения – импульсной реакции, функции рассеяния точки, модуляционной передаточной функции. Трудоемкость этого уровня на два порядка выше предыдущего. Затем



идет уровень математического моделирования формирования изображений каких-либо объектов, более трудоемкий еще на порядок. Разделение анализа на уровни очень важно для экономии ресурсов компьютера, времени проектировщика и исключения ненужных затрат. В самом деле, если проектное решение не удовлетворяет техническому заданию по основным характеристикам, определяемым на начальных уровнях анализа, то не стоит тратить ресурсы компьютера и проектировщика для проведения трудоемких вычислений на последующих уровнях.

На каждом уровне проектирования можно выделить следующие виды анализа: одновариантный (точечный), поливариантный, технологический. **Одновариантным** называется анализ, при котором характеристики проектируемого объекта определяются только для одного набора значений параметров. Он применяется в случае, когда требуются значения характеристик конкретного проектного решения. На практике он распространен наиболее широко. На языке математики об одновариантном анализе можно сказать, что при его реализации вычисления производятся в одной точке пространства параметров. Поэтому такой вид анализа называют также точечным. **Поливариантным** называется анализ, при котором характеристики проектируемого объекта определяются для нескольких вариантов. Последние имеют по отношению друг к другу небольшие отличия: возмущения или приращения в значениях некоторых параметров. Тем самым как бы определяется чувствительность характеристик объекта к изменениям параметров. Поэтому поливариантный анализ называют иногда анализом влияния параметров или анализом чувствительности. При полном анализе чувствительности определяется влияние всех параметров на все характеристики. При этом вычисляется полная матрица производных всех характеристик по всем параметрам:

$$A = \left[ \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right], \text{ где } i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4.4)$$

где  $m$  – количество характеристик,  $n$  – количество параметров. При выборочном анализе влияния параметров исследуется влияние только некоторых параметров на некоторые характеристики.

Для анализа чувствительности обычно применяют конечно-разностные методы, при которых каждый из параметров поочередно возмущается на заданное приращение. В полученных точках производятся вычисления искомых характеристик. При этом могут использоваться как односторонние, так и двусторонние методы. В последнем случае возмущение параметра производится поочередно в обе стороны от исходной точки. Понятно, что при использовании конечно-разностных методов трудоемкость анализа по сравнению с точечным возрастает соответственно в  $n$  или в  $2n$  раз. Для уменьшения трудоемкости этого вида анализа применяют методы аналитического дифференцирования, но только в случаях сравнительно простых математических моделей проектируемых объектов.

Анализ влияния параметров позволяет оценить степень чувствительности проектного решения к изменению тех или иных параметров, другими словами, степень его устойчивости. Для эвристической оценки устойчивости обычно достаточно выборочного анализа влияния. Полный анализ влияния отличается высокой трудоемкостью, содержит большое количество трудно обозримой информации и используется весьма редко. Он безусловно необходим для технологического анализа или в процессе оптимизации.

**Технологический** анализ заключается в назначении и моделировании технологических допусков, то есть допустимых отклонений параметров проектируемого объекта от номинальных значений. Технологическому анализу всегда предшествует полный анализ влияния параметров, дающий для него необходимую информацию. Технологический анализ состоит из двух этапов: распределения допусков по отдельным параметрам и статистического моделирования назначенных допусков с их возможной последующей коррекцией.

Алгоритм анализа выглядит следующим образом (Рис. 4.4):



Рис.4.4. Алгоритм анализа

Процедура “Задание на анализ” является эвристической. В процессе ее выполнения выбирается уровень, вид и метод анализа, задаются режимы анализа, форма отображения результатов и так далее. Ответственным моментом является здесь выбор уровня анализа, обеспечивающего минимальную общую трудоемкость проектирования. “Анализ” – это совершенно детерминированная операция, выполняемая компьютером в соответствии с полученным заданием.

Процедура “Оценка результатов анализа” является, конечно, эвристической. В результате ее выполнения могут быть приняты следующие решения:

7. При оценке результатов данного уровня как приемлемых осуществляется переход на следующий уровень или вид анализа, то есть возврат к процедуре “Задание на анализ” с изменением уровня или режимов анализа.
8. При оценке результатов всех необходимых уровней как приемлемых, проектирование на данном узле считается выполненным успешно и осуществляется переход на следующий уровень всего процесса.
9. При оценке результатов данного уровня как неприемлемых делается переход к попытке оптимизации.

Характерной особенностью анализа является большое количество циклов возврата с углублением уровня и изменением вида анализа или изменением его режимов. Анализ относится к умеренно объектно-ориентированным процедурам. Его аппарат зависит от физической сущности проектируемого объекта и естественно различен для оптических, электронных, кинематических схем. Но он практически не зависит от конкретного типа объекта, то есть, например, для любых оптических схем применяется один и тот же аппарат. Такие методы анализа, как анализ влияния параметров конечно-разностным методом, технологический анализ являются универсальными и в принципе пригодными для анализа любых объектов. Как показывает опыт, эвристические процедуры “Задание на анализ” и “Оценка результатов” достаточно просты и не имеют большого объема работы в противоположность синтезу, где роль объема эвристической части является часто определяющей. Основной же объем работы здесь приходится на выполнение детерминированной процедуры “Анализ”. При анализе очень велика роль процедуры “Оценка результатов”. Именно здесь в наибольшей мере проявляются опыт и квалификация проектировщика: он должен разбираться в многочисленных промежуточных результатах, правильно оценивать их часто в отсутствии четких критериев, безошибочно принимать решения о дальнейших действиях.

#### 4.5 Оптимизация

Последней и, вероятно, наиболее важной задачей проектирования является оптимизация. Она представляет собой плавное, постепенное изменение параметров проекта с целью улучшения его качества, достижения оптимальных наиболее благоприятных, наилучших значений заданных характеристик. Оптимизация не может начинаться “от нуля”, от пустого места, для нее необходимо начальное приближение, стартовая точка.

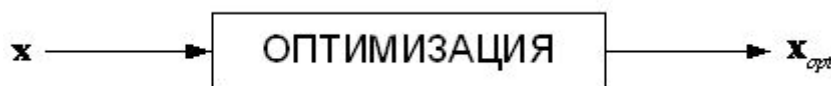


Рис.4.5. Оптимизация

Эта точка соответствует предварительно синтезированной структуре, полученной с некоторыми приближенными, начальными значениями параметров. По завершении оптимизации определяют окончательные значения параметров, обеспечивающие лучшие, оптимальные значения характеристик. Существенно, что при оптимизации структура проектируемого объекта остается неизменной, меняются лишь значения параметров этой структуры. В количественном выражении эти изменения часто столь малы, что оптимизированная конструкция или схема внешне практически не отличаются от исходных, хотя улучшение характеристик может быть разительным.

Проблема оптимизации состоит в том, чтобы найти правильную закономерность одновременного изменения большого количества параметров, или, другими словами, найти нужную “траекторию движения” в пространстве параметров. Для решения этой проблемы привлекается довольно сложный математический аппарат. Благодаря достижениям математиков и программистов оптимизация превратилась в мощнейший инструмент проектирования, без которого разработка современных оптических приборов была бы невозможной. Именно оптимизация позволяет из весьма приближенного начального проектного решения получать за весьма сжатое время проект, удовлетворяющий самым напряженным и трудно сочетаемым требованиям. С помощью современных методов и программ оптимизации даже начинающий проектировщик может достаточно быстро получить решение, которое ранее было доступно только проектировщикам с огромным опытом и интуицией.

Для выполнения оптимизации необходимо прежде всего построить так называемую оптимизационную модель объекта. Эта модель включает в себя параметры оптимизации, оптимизируемые функции, критерий оптимизации, а также ограничения.

**Параметры оптимизации** – это те параметры, изменением которых пытаются добиться улучшения характеристик. Обычно не все параметры структуры объекта (конструктивные параметры) включаются в оптимизацию. Так как при прочих равных условиях, трудоемкость оптимизации пропорциональна числу параметров, то начинать оптимизацию надо с небольшого количества тщательно отобранных параметров, а затем их количество постепенно увеличивается. По этой же причине при оптимизации часто изменяют не непосредственно конструктивные параметры, а другие величины, связанные с ними определенным образом.

Математические величины, связанные с характеристиками, которые в процессе оптимизации необходимо улучшить, называются **оптимизируемыми функциями**. Обычно эти функции определяют таким образом, чтобы их оптимальные значения были равны нулю. Это условие выражается в виде:

$$f_i = \left( \frac{u_i - \bar{u}_i}{\delta u_i} \right) w_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (4.5)$$

**Критерий оптимизации**, или оценочная функция, – это число, дающее общую оценку оптимизации по всем функциям. Обычно в качестве критерия выбирают сумму квадратов оптимизируемых функций.

Правильный выбор оптимизируемых функций является одним из ключевых моментов оптимизации. Этот выбор должен удовлетворять трем противоречивым требованиям: адекватности, простоты и низкой трудоемкости.

Требование **адекватности** означает, что минимизация суммы квадратов оптимизируемых функций должна соответствовать действительному улучшению качества проектируемого объекта. Сложность обеспечения адекватности заключается в том, что, во-первых, истинное качество проекта часто описывается достаточно большим набором характеристик, иногда сформулированных недостаточно четко, и поэтому часто не позволяющим количественно описать это качество суммой квадратов функций. Во-вторых, в тех случаях, когда это можно сделать, оптимизируемые функции получаются сложными и не удовлетворяют требованиям простоты и низкой трудоемкости.

Требование **простоты** оптимизации математически выражается линейным характером зависимости оптимизируемых функций от параметров. Чем ближе указанные зависимости к линейным, тем успешнее идет оптимизация. При строгой линейности современные методы дают решение за один шаг. Напротив, чем более нелинейны эти функции, тем больше шагов требует процесс оптимизации, тем медленнее он сходится.

**Трудоемкость** оптимизации определяется тем количеством вычислений, которые необходимы для реализации процесса нахождения значений функций по текущим значениям параметров. Этот процесс (часто называемый “пробой”) при оптимизации повторяется гигантское количество раз. Поэтому затраты на оптимизацию прямо пропорциональны трудоемкости “пробы” и, если она оказывается большой, то процесс оптимизации может стать долгим, а получение результатов за обозримое время проблематичным.

Нетрудно убедиться, что указанные условия противоречивы. Действительно, ведь достижение высокой адекватности приводит к усложнению зависимостей функций от параметров и увеличению трудоемкости их вычислений. Например, при оптимизации оптических систем в качестве одной из важнейших характеристик рассматривается разрешающая способность. Поэтому для достижения полной адекватности оптимизации желательно максимизировать разрешающую способность, то есть минимизировать обратную ей величину. Однако разрешающая способность оптической системы определяется по частотной передаточной характеристике (модуляционной передаточной функции) довольно сложным образом. Вычисление этой функции требует, в свою очередь, гигантского количества действий. Кроме того эта функция весьма нелинейно зависит от параметров оптимизации оптической системы (радиусов кривизны поверхностей, осевых расстояний, показателей преломления). Гораздо проще и на порядок менее трудоемко использовать в качестве оптимизируемых функций аберрации отдельных лучей, но это, правда, не гарантирует максимизации разрешающей способности. В этом случае необходимая адекватность может быть получена

путем эмпирического подбора значений весовых коэффициентов для аберраций различных лучей. Из примера видно, что выбор оптимизируемых функций, как и параметров оптимизации, является типично эвристической задачей.

В оптимизационную модель входят также **функции-ограничения**. Они не позволяют изменяться параметрам оптимизации совершенно свободно. Различают ограничения-равенства, выражающие необходимость сохранения при оптимизации заданных значений каких-либо характеристик, и ограничения-неравенства, описывающие различного рода требования физической реализуемости, габаритов, технологичности и другие.

Принципы оптимизации одинаковы для любых объектов: оптических систем, кинематических схем, технологических процессов и другие. В этом смысле оптимизация является полностью объектно-инвариантной процедурой. Процесс оптимизации всегда строится как последовательность “пробных точек”, расположенных в пространстве параметров. В них производятся “пробы”: сначала в исходной точке, соответствующей начальной конструкции, затем в промежуточных, пока не будет найдена точка минимума оценочной функции (при соблюдении ограничений). Процесс оптимизации состоит из повторяющихся шагов, причем начальное состояние каждого из шагов совпадает с конечным состоянием предыдущего. На каждом шаге производится анализ свойств оптимизируемой системы в окрестности исходной точки данного шага. Количество “проб”, которое на это обычно тратится, пропорционально количеству параметров. Затем определяется вектор движения в пространстве параметров в наилучшем направлении, обеспечивающем скорейшее уменьшение оценочной функции, и, наконец, производится движение по этому “вектору спуска” до наилучшей на данном шаге точки. На спуске вдоль выбранного направления тратится обычно от одной до десяти “проб”. Затем найденная точка принимается за начальную точку следующего шага, и процесс повторяется. С приближением к минимуму процесс замедляется. При этом очередной шаг не приводит к заметному уменьшению величины оценочной функции. Количество шагов, требуемых для достижения минимума, и обеспечивающих сходимость процесса, зависит от линейности оптимизируемых функций (и ограничений) по отношению к параметрам. Трудоемкость каждого шага определяется, очевидно, трудоемкостью “пробы” и количеством параметров оптимизации. Существует большое количество самых разнообразных методов оптимизации, работающих по описанной схеме. Эти методы отличаются друг от друга правилами анализа свойств системы в окрестности исходной точки, принципами построения направления спуска, алгоритмами движения по этому направлению, способами контроля ограничений.

Оптимизация, также как синтез и анализ, реализуется в виде набора процедур (Рис. 4.6).

Первой в ней идет эвристическая процедура – “Задание на оптимизацию”. Ее содержание состоит в построении оптимизационной модели проектируемого объекта, то есть выборе параметров оптимизации, оптимизируемых функций, ограничений (типа равенств и неравенств). На этом этапе производится также

выбор метода и режимов оптимизации. Роль этой процедуры чрезвычайно велика.



Рис.4.6. Алгоритм оптимизации

Как уже говорилось, выбор оптимизационной модели, метода и режимов оптимизации решающим образом влияет на скорость оптимизации и ее результат. Неудачный выбор оптимизируемых функций (в смысле их нелинейности) или неподходящего метода приводит к крайне низкой сходимости, то есть к большому количеству шагов оптимизации при медленном уменьшении оценочной функции. Плохая адекватность оптимизационной модели приводит к тому, что достигнутый минимум оценочной функции не соответствует улучшению по другим, более сложным характеристикам качества, и конструктор вынужден отвергнуть полученный результат. Выбор слишком трудоемкой “пробы” или неудачного для данной ситуации метода приводят к резкому возрастанию времени, затрачиваемому на каждый шаг оптимизации. В результате конструктор может не выполнить оптимизацию в отведенный ресурс времени. Эвристичность процедуры “Задание на оптимизацию” определяется тем, что не существует строгих правил выбора оптимизационной модели и метода оптимизации для всех возможных ситуаций. Правильный выбор достигается благодаря только опыту и квалификации проектировщика, приобретенным в результате длительного обучения и практики.

Детерминированная процедура “Оптимизация” выполняется компьютером по заданию на оптимизацию, составленному конструктором. При этом

компьютер по заложенной в него программе реализует выбранный метод и алгоритм оптимизации. Как отмечалось выше, процесс оптимизации является итерационным и состоит из повторяющихся шагов. Проектировщик может следить за ходом оптимизации, то есть за изменениями в параметрах оптимизации, оптимизируемых функциях, критерия оптимизации. При неоправданно медленном продвижении процесса проектировщик может остановить его. После завершения оптимизации или ее принудительной остановки проектировщик производит эвристическую оценку результатов и принимает решение о дальнейших действиях.

Решение “1” означает возврат на оптимизацию с изменением или модификацией оптимизационной модели, например, путем добавления параметров функций, изменением метода оптимизации. Решение “2” принимается, когда после эвристической оценки результат оптимизации выглядит удачным и необходим переход к его полному анализу. Решение “3” принимается в случае неудачного результата оптимизации, когда проектировщик считает, что причиной неудачи является стартовая точка, и поэтому производится возвращение к синтезу другого начального приближения. Решение “4” принимается после многократных неудачных попыток оптимизировать проектную задачу на данном уровне и состоит в возврате на предыдущий уровень.

Оценивая задачу оптимизации в целом, можно сказать, что во-первых, ее эвристическая часть по объему не очень велика, но крайне важна и требует высокой квалификации и опыта проектировщика. Во-вторых, детерминированная часть отличается крайне высокой трудоемкостью, часто наибольшей по сравнению с трудоемкостью решения других задач проектирования (синтеза и анализа). В-третьих, оптимизация относится к объектно-инвариантным процедурам, поскольку ее принципы, методы и алгоритмы совершенно универсальны.

#### **4.6 Типовой алгоритм проектирования**

Как показано выше, алгоритм проектирования складывается из последовательного решения задач синтеза, анализа и оптимизации (Рис. 4.7).

Характерным для алгоритма проектирования является чередование эвристических и детерминированных процедур. Первые выполняются человеком-проектировщиком на основе его опыта, знаний и квалификации, вторые выполняются компьютером. Из такого чередования следуют естественная неизбежность интерактивного, диалогового режима работы проектировщика с компьютером и невозможность полной автоматизации проектирования. Даже при максимальном использовании компьютерной техники проектирование всегда будет именно автоматизированным, а не автоматическим. Важнейшим при этом оказывается оптимальное разделение функций между человеком и компьютером.



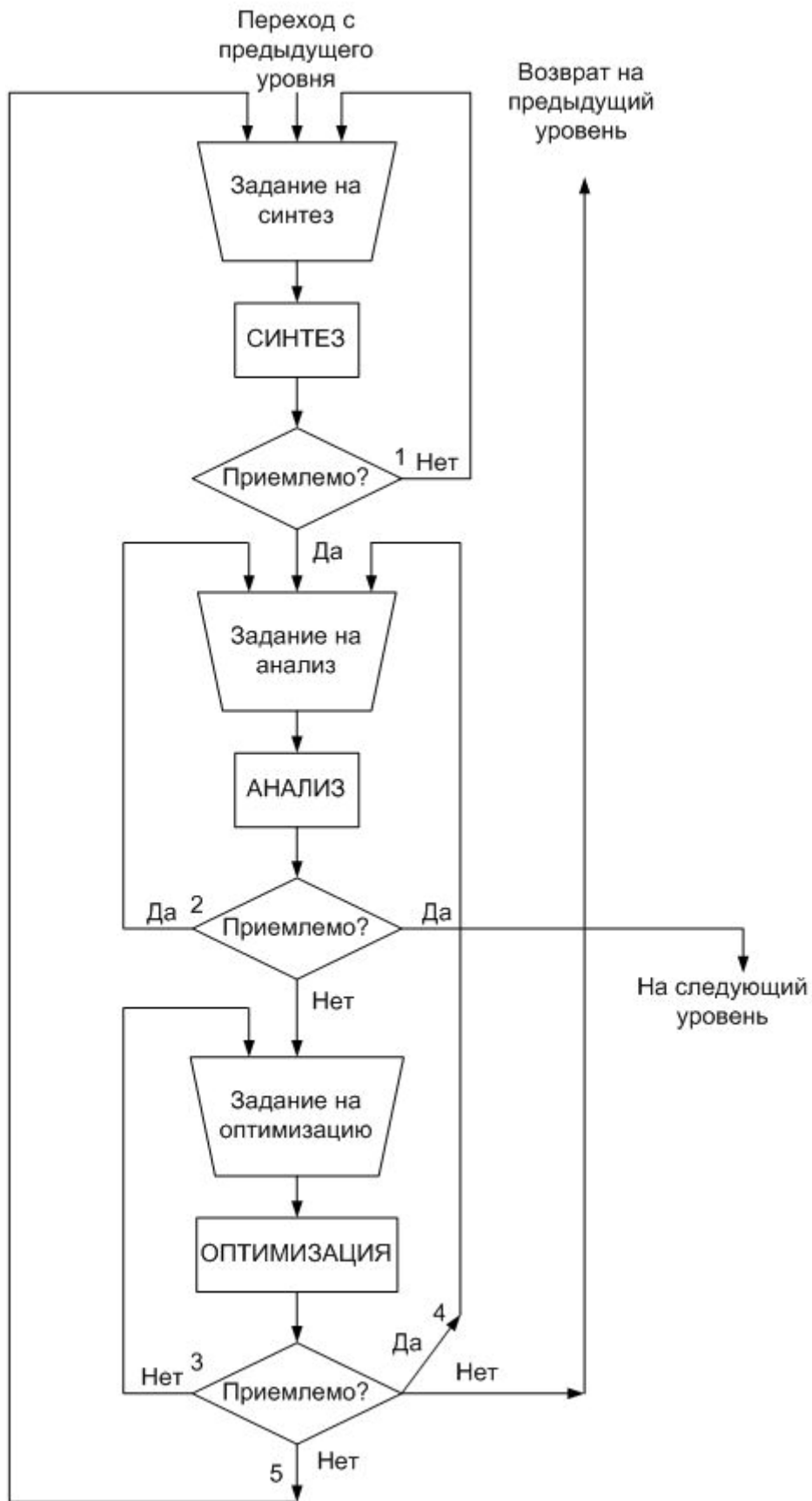


Рис. 4.7. Типовой алгоритм проектирования

Из схемы на рисунке 4.7 наглядно виден итерационный характер проектирования. Это обусловлено наличием многократных возвратов на повторение отдельных процедур с измененными заданиями. Практика показывает, что циклы повторений вложены друг в друга, то есть имеют место ситуации, называемые “циклом в цикле”. Так, например, при проектировании оптических систем приходится выполнять несколько итераций в области синтеза по пути, обозначенному номером “1”, до нескольких десятков итераций в области анализа по пути “2”, до десятка и более итераций в области оптимизации по пути “3”, столько же возвратов от оптимизации к анализу по пути “4”, несколько возвратов от оптимизации к синтезу по пути “5” и так далее. Если учесть, что на рисунке 4.7 показан алгоритм проектирования только на одной ветви и на одном уровне общего дерева, то еще возможны возвраты на верхние уровни. Линейный, то есть без возвратов, процесс проектирования осуществим практически разве что в самых примитивных случаях.

Следует иметь в виду, что итерационный характер проектирования связан с наличием эвристических процедур, а они (именно в силу своей неоднозначности) привести к оптимальному результату сразу не могут и требуют неоднократных последующих корректировок, изменений и пересмотров стартовых точек.

## Решение эвристических задач проектирования

Процесс проектирования оптических приборов, как было показано выше, может быть представлен в виде движения по дереву проектирования с поиском решений проектных задач на каждом его уровне и каждой ветви. Эвристический характер многих задач проектирования существенно затрудняет это движение, часто создавая перед проектировщиком неопределенные, тупиковые ситуации, обусловленные недостаточностью информации и многозначностью возможных вариантов решений.

При решении эвристических задач проектировщик проходит следующие этапы:

1. Исследование исходной проектной ситуации (формулирование технического задания для данной проектной задачи, поиск и анализ литературы, выявление проблем, выбор методов анализа, оценок и критериев решения задачи).
2. Анализ и преобразование структуры задачи.
3. Определение границ, описание промежуточных решений и выявление конфликтов.
4. Комбинирование промежуточных решений и формирование вариантов решения.
5. Оценка вариантов решения и выбор окончательного варианта.

Преодоление трудностей на каждом из этих этапов, поиск выхода из тупика возможны на основе применения методов и приемов, которые организуют, направляют и стимулируют мыслительную деятельность проектировщика. Изучение и практическое освоение этих методов способствует развитию творческого мышления и интуиции, необходимых при решении задач эвристического и изобретательского характера. Рассмотрим некоторые методы решения эвристических задач.

### ***Мозговая атака***

Мозговая атака, или мозговой штурм, состоит в стимулировании группы проектировщиков к быстрому генерированию достаточно большого количества идей и информации в области проектируемого объекта. Мозговая атака проводится одной группой или несколькими группами параллельно в виде конференции. Каждый ее участник свободно выдвигает предложения, которые обычно записываются (фиксируются) на карточках. Перед конференцией проблема должна быть проанализирована, подготовлена и сформулирована. Формулировка должна отражать необходимость решения задачи и ее основные ограничения.

Метод требует от каждого участника конференции большого опыта и знаний в исследуемой области. Во время мозговой атаки запрещается критиковать предложения участников сколь бы нереальными они казались на

первый взгляд. Всем участникам рекомендуется способствовать совершенствованию и увеличению выдвинутых коллегами идей.

Мозговая атака обычно продолжается не более тридцати минут. Необходимым и важным этапом метода является проводимая после мозговой атаки классификация выдвинутых идей и их оценка на практическую пригодность. Оценка состоит в критике предложенных решений, которая была запрещена во время конференции. После упорядочивания и оценки выдвинутых идей выносятся решение о дальнейшей их обработке. Выполнение этой работы возлагается на руководителей групп. Наиболее эффективные и реализуемые идеи выносятся на заключительное обсуждение.

Метод мозговой атаки является наиболее доступным и поэтому достаточно часто применяется на всех этапах проектирования, но считается, что он особенно эффективен при синтезе структур объектов. Метод используется обычно не для получения готовых, проработанных решений, а лишь для активизации творческой деятельности и генерирования новых перспективных идей, способствующих продвижению в решении проблемы. Многие решения при этом оказываются технически и экономически нереализуемыми.

## 5.2 Синектика

Суть этого метода состоит в организации и направлении спонтанной мыслительной деятельности участников конференции на решение конкретной задачи, с использованием аналогий как средства целенаправленного ориентирования мышления. При этом возможно использование различных типов аналогий:

- прямые аналогии с системами из других прикладных областей;
- субъективные аналогии, когда разработчик ставит себя на место разрабатываемого объекта;
- символические аналогии, когда используются художественные метафоры и используются символические термины (дерево, заглушка, нарцисс и другие);
- фантастические аналогии, которые позволяют представить себе несуществующие аналогии (человек-невидимка, ковер-самолет, живая вода и другие).

При синектике подбирается состав разнообразных специалистов, которые должны обладать знаниями и большим опытом в разных научных областях (например, в биологии, механике, физиологии). Работа группы синектики обычно проводится в следующей последовательности:

1. формулировка проектной задачи;
2. поиск аналогий и выдвижение возможных решений;
3. исключение неперспективных решений;
4. формулирование решения задачи.

Аналогии, на которых базируется синектика, позволяют сместить процесс исследования задачи с уровня осознанного мышления на уровень спонтанной

активности мозга и нервной системы и существенно повысить степень мышления, восстановления известных из опыта решений, близких к искомому. Например, при конструировании устройств прибора конструктор может найти аналогии в биологии и другие.

### **5.3 Ликвидация тупиковых ситуаций**

Целью этого метода является поиск новых направлений поиска, когда другие методы не дали результатов и привели в тупик. Ликвидация тупиковых ситуаций состоит в попытках продвижения в одном из следующих направлений:

- определение новых преобразований, которые могут разрешить тупиковую ситуацию (например, неудачное решение можно подвергнуть таким преобразованиям, как модификация, перекомпоновка, замена, объединение, обращение, масштабирование);
- поиск новых взаимосвязей связей между элементами неудовлетворительного решения (при этом составляется матрица взаимного влияния всех элементов проекта);
- переоценка тупиковой ситуации, состоящая в том, что сначала определяют условия, позволяющие реализовать решение, а затем устанавливаются последствия, которые могут возникнуть при отсутствии этого решения (при этом обычно условия, необходимые для решения, могут оказаться под контролем проектировщика, а последствия отказа от решения могут стать допустимыми или устранимыми в случае решения более простой задачи).

### **5.4 Метод морфологических таблиц**

Целью метода является расширение области поиска решений проектной задачи. Метод состоит в заполнении так называемых морфологических таблиц (матриц) с последующим выбором из них большого числа возможных решений. Сначала в таблицы заносится набор характеристик, которому должен удовлетворять элемент на рассматриваемом уровне проектирования. Затем для каждой характеристики перечисляются все возможные, пусть даже частичные решения. При этом принцип поиска решения состоит в выборе по некоторым критериям (например, массе, габаритам, стоимости) наилучшего решения из каждого ряда.

Каждый из перечисленных методов применяется в той или иной ситуации, в той или иной рабочей группе. Метод мозговой атаки применяется на начальных этапах решения задачи, когда необходимо широко охватить поле проектных решений. Применение метода возможно в группе разработчиков. Метод синтетики может применяться и одним разработчиком, но он должен обладать широкой эрудицией и ассоциативным мышлением. Метод ликвидации тупиковых ситуаций может применяться всеми, но только в ситуации тупика.

---

Метод морфологических таблиц является наиболее эффективным для опытных проектировщиков, имеющих глубокие знания в исследуемой проблеме. У неопытных – возникают большие трудности с выбором как необходимого набора характеристик, так и возможного рационального числа частичных решений. Ведь количество комбинаций по мере увеличения числа характеристик и частичных решений очень быстро возрастает, что делает поиск приемлемого решения практически невозможным.

## Глава 6. Стандартизация, унификация и агрегатирование

Современная практика проектирования невозможна без широкого применения методов стандартизации, унификации и агрегатирования приборов. Эти методы позволяют сократить номенклатуру приборов, уменьшить разнородность их узлов и деталей, увеличить масштаб выпуска, обеспечить широкие возможности потребителю в процессе их эксплуатации и ремонта. В процессе проектирования они сокращают количество итераций, уменьшают объем работ на каждом уровне. В конечном счете, это приводит к сокращению сроков и повышению качества проектирования. Методы стандартизации, унификации и агрегатирования относятся к числу прогрессивных методов проектирования. Определим их основные черты и характеристики.

**Стандартизацией** называется установление единых норм и требований, предъявляемых к сырью, полуфабрикатам, материалам, производственным процессам, готовым изделиям, приборам, а также проектно-конструкторской документации. В настоящее время разрабатывается и широко внедряется международная система стандартов ISO (по названию организации International Organization for Standardization). Система государственных стандартов (ГОСТ) России, как страны входящей в эту организацию, не должна противоречить международным стандартам. В свою очередь, отраслевые стандарты (ОСТ), регламентирующие различные аспекты проектирования и производства в данной отрасли промышленности, должны быть согласованы с ГОСТ, а стандарты предприятий (СТП) не должны противоречить ОСТ. Некоторые национальные стандарты (например, ANSI, MIL) могут фактически использоваться как международные. Таким образом, формируется иерархическая система стандартов, которой должны руководствоваться в своей деятельности проектировщики. Например, в оптическом приборостроении следует руководствоваться следующими группами стандартов (Табл. 6.1):

Табл. 6.1. Некоторые стандарты в области оптического приборостроения

<b>ISO</b>	ISO 9211	Optical coatings
	ISO 9336	Optical transfer function
	ISO 10110	Preparation of drawings for optical elements and systems
	ISO 11146, 11151, 11554	Lasers and laser-related equipment
<b>ГОСТ</b>	ГОСТ 1807-75	Радиусы сферических поверхностей оптических деталей. Рады числовых значений.
	ГОСТ 2736-82	Стекла пробные для проверки радиусов кривизны оптических поверхностей.
	ГОСТ 3361-75	Окуляры и тубусы микроскопов. Присоединительные размеры.
	ГОСТ 7427-76	Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения.
	ГОСТ 7601-76	Физическая оптика. Обозначения основных величин.
	ГОСТ 11141-84	Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы

		контроля.
	ГОСТ 3524-96	Стекло оптическое бесцветное. Технические условия.
	ГОСТ 3516 – 3522	Методы оценки качества стекла (Однородность, двулучепреломление, бесвильность, пузырность).
	ГОСТ 2.412-81	ЕСКД. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.

Стандарты, относящиеся к одной и той же тематике, объединяют в сборники (например, стекло оптическое). Некоторые сборники стандартов официально объединяются под единым названием (ЕСКД – единая система конструкторской документации; ЕСПД – единая система программной документации). Кроме стандартов разработано большое количество другой нормативной документации (ведомственные нормалы, руководящие материалы, технические условия). Предприятия, выпускающие продукцию на экспорт, должны согласовать проектные решения со стандартами той страны, в которую экспортируется изделие.

**Унификация** – это уменьшение числа видов и типов приборов одинакового функционального назначения, а также сокращение типов, марок, сортамента узлов и деталей, входящих в них. В основе унификации лежат различные стандарты, различающиеся требованиями, предъявляемыми к приборам. Результатом унификации является создание серии приборов, имеющих аналогичное назначение, но состоящих из ограниченного числа стандартизованных взаимозаменяемых узлов и деталей и отличающихся от базовой (основной) модели лишь значениями некоторых характеристик, размерами, дополнительными узлами и деталями. Такие приборы называются унифицированными.

Применение стандартизации и унификации дает экономический и качественный эффект при проектировании оптических приборов на всех его уровнях, включая функциональное, конструкторское и технологическое. В частности, на уровне функционального проектирования сначала составляется и обосновывается перечень тех функциональных элементов, которые рационально унифицировать в серии приборов. Далее выполняется функциональное проектирование этих элементов, то есть определяются их оптимальные структуры, типы и характеристики. Унификация может существенно уменьшить число разного рода схем (оптических, электрических и других) проектируемой серии оптических приборов. Она позволяет применять унифицированные или стандартизованные детали и узлы, изготавливаемые централизованно и обладающие высоким качеством, надежностью и минимальной стоимостью. Унификация приводит к существенному сокращению объема проектирования унифицируемой серии приборов. Уменьшение номенклатуры приборов и их узлов позволяет специализировать процесс изготовления приборов и улучшить их эксплуатационные характеристики.

**Агрегатирование**, или модульное проектирование, заключается в разработке приборов на основе их компоновки из ограниченного числа унифицированных блоков (модулей), обладающих функциональной и



геометрической взаимозаменяемостью. Модульное проектирование является высшей формой унификации и позволяет получать большое число видов приборов из минимально возможного числа модулей. Важнейшей особенностью агрегатирования является повышение универсальности прибора путем применения широкого набора модулей в процессе эксплуатации. Большой выбор модулей обуславливает и широкий диапазон изменения характеристик прибора, его схем, конструкции и стоимости. Компоновка приборов из модулей производится самим пользователем (заказчиком, покупателем) в соответствии с прилагаемыми инструкциями и чертежами. Модульное проектирование, с одной стороны, уменьшает объемы и сроки проектирования, с другой, – обеспечивает широкие возможности пользователю.

Модульное проектирование получило большое распространение в микроскопостроении. Здесь разработаны агрегатные модели микроскопов, в которых модулями являются: микрообъективы и окуляры, предметные столики, осветительные устройства, монокулярные и бинокулярные насадки, проекционные экраны, тубусы, микрофотонасадки. Примерами микроскопов, спроектированных по модульному принципу, являются биологические агрегатные микроскопы БИОЛАМ, поляризационные агрегатные микроскопы ПОЛАМ (Рис. 6.1.)

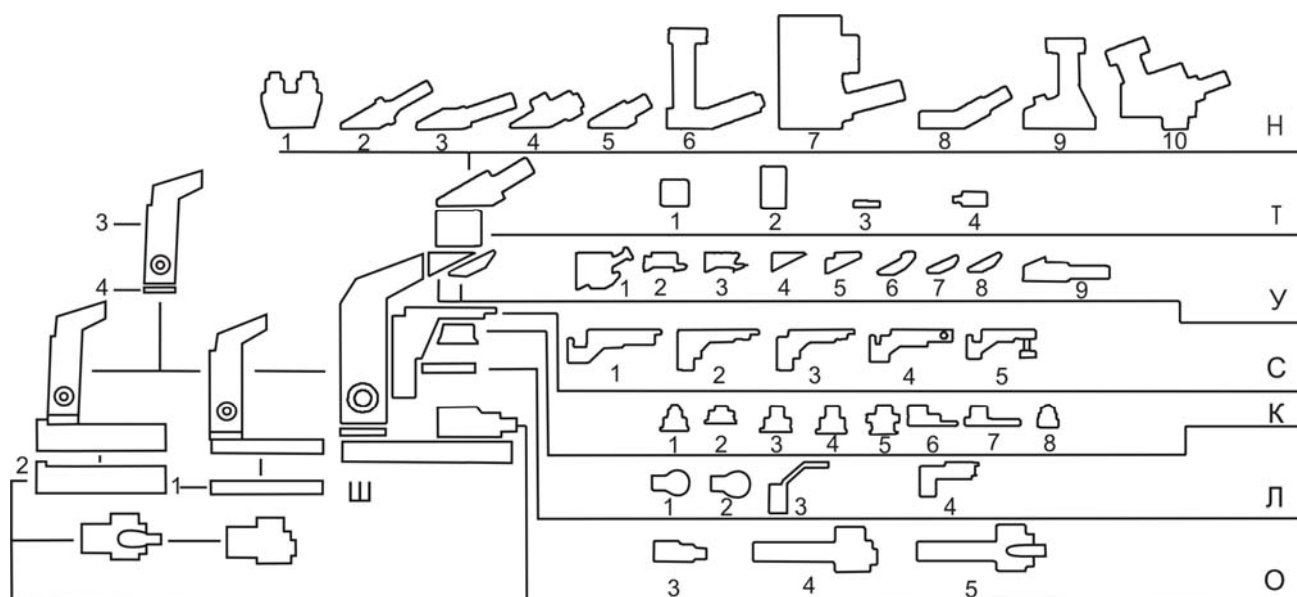


Рис. 6.1. Схема унификации агрегатных микроскопов: Н – насадки окулярные, Т – тубусы промежуточные, У – устройства для установки объективов и осветители отраженного света, С – столики предметные, К – конденсоры, Л – откидные линзы, механизмы конденсоров, О – осветительное устройство, Ш – штатив

Говоря о методах, повышающих качество проектирования, нельзя не отметить важную роль **автоматизации** проектирования. На сегодняшний день невозможно представить наукоемкое производство без САЕ/CAD/CAM-систем, применение которых значительно сокращают сроки выпуска продукции, а также ставит проектирование на качественно более высокий уровень.