

**С.М.Боровиков**

**Теоретические основы  
конструирования, технологии  
и надежности**

*Утверждено Министерством образования  
Республики Беларусь в качестве учебника  
для студентов инженерно-технических  
специальностей высших учебных заведений*

**Минск  
Издательство "Дизайн ПРО"  
1998**

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32.84я7

Б83

Рецензенты: кафедра "Конструирование и технология  
радиоэлектронных систем" Полоцкого  
государственного университета,  
зав.каф. М.М.Юрцевич; С.Н.Юрко

**Боровиков С.М.**

**Б83** Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. — Мн.: Дизайн ПРО, 1998. — 336 с.: ил.

**ISBN 85-6182-51-4**

Рассматриваются приемы математического описания параметров и получения математических моделей радиоэлектронных устройств и технологических процессов их производства. Излагаются основы теории и методы анализа точности и стабильности выходных параметров, основы теории надежности и методы оценки показателей надежности проектируемых радиоэлектронных устройств.

Для студентов специальности "Проектирование и производство радиоэлектронных средств" в качестве учебника. Может быть полезна студентам других радиоэлектронных специальностей, а также широкому кругу специалистов, занимающихся применением прикладных математических методов в конструкторско-технологическом проектировании и надежности технических изделий.

**Гос. Заказ**

**УДК 621.396.6(075.8)**

**ББК 32.84я7**

**ISBN 985-6182-51-4**

**© Боровиков С.М., 1998**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является учебником для вузов по дисциплине "Теоретические основы конструирования, технологии и надежности". В ней изложен учебный материал в соответствии с программой указанного курса для студентов специальности "Проектирование и производство радиоэлектронных средств".

В основу написания книги положены лекции, читаемые автором в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники. Использованы также результаты научно-исследовательских работ, выполненных при участии автора. В немалой степени отпечаток на содержание книги наложило участие автора в работе научно-методического Совета Минвуза СССР по специальности "Конструирование и производство радиоаппаратуры", а также (начиная с 1988 г.) научно-методической комиссии по специальности "Конструирование и технология радиоэлектронных средств" при учебно-методическом управлении по радиотехнике, электронике и связи Госкомитета по народному образованию СССР.

В первой главе книги дается общая характеристика параметров радиоэлектронных средств (РЭС), излагается суть системного подхода к проектированию конструкций и технологических процессов их производства.

Во второй главе рассматривается описание параметров с учетом их вероятностного рассеяния.

В третьей главе изложены приемы построения математических моделей с использованием пассивного и активного факторных экспериментов.

В четвертой главе приводятся методы анализа точности и стабильности выходных параметров радиоэлектронных устройств и технологических процессов с использованием математических моделей.

Пятая глава посвящена основам теории надежности, определению показателей надежности проектируемых радиоэлектронных устройств, а также приемам обеспечения надежности на этапе их проектирования.

В шестой главе рассматривается решение задач прогнозирования технического состояния и надежности радиоэлектронных устройств и их элементов.

В седьмой главе дается характеристика задач оптимизации, с которыми приходится сталкиваться в процессе конструкторско-технологического проектирования РЭУ.

В восьмой главе рассматривается применение теории массового обслуживания в решении производственно-технологических задач.

В девятой главе излагаются приемы статистического моделирования параметров радиоэлектронных устройств и технологических процессов. При этом акцент делается на моделирование с использованием ЭВМ.

В учебнике приводится ряд примеров решения прикладных инженерных задач, что, по мнению автора, поможет лучше освоить излагаемый учебный материал.

Книга может быть использована в учебном процессе студентами других специальностей, ориентированных на проектирование и производство радиоэлектронных изделий.

В целом учебник дает основы для приобретения, а в дальнейшем и развития навыков в применении прикладных математических методов для проектирования радиоэлектронных устройств и технологических процессов их производства.

Это позволит выпускнику вуза в условиях проектных организаций и предприятий осмысливать и четко формулировать стоящие перед ним задачи, решение которых основывается на использовании прикладных математических методов. Для этого специалисту потребуется минимум времени для применения известных ему или изучения и применения новых методов.

## ВВЕДЕНИЕ

Конструкторско-технологическое проектирование является важнейшей составной частью создания радиоэлектронных устройств (РЭУ). От успешного выполнения этого этапа во многом зависят качественные показатели РЭУ.

Разработка конструкций и технологии РЭУ в определенной степени являются творческими процессами. Удачность этих процессов во многом зависит от потенциальных дарований, опыта и интуиции инженера. Однако, независимо от наличия указанных качеств, радиоинженеру конструктору-технологу приходится прибегать к помощи математических методов при выборе решений и оценке их качества. При этом широко используются аналитические методы анализа.

Во многих случаях оценить качественные показатели чисто аналитическими приемами весьма затруднительно, либо вообще не представляется возможным. В этих случаях прибегают к экспериментальным методам. Например, для аналитической оценки точности или стабильности функционального параметра РЭУ необходимо располагать математическим выражением (моделью), связывающим этот функциональный параметр с параметрами элементов, входящих в состав устройства.

Для большинства устройств получить такое выражение чисто аналитическими приемами весьма сложно. Поэтому интересующее математическое выражение получают, используя экспериментальные методы.

Таким образом, для радиоинженера конструктора-технолога важны как аналитические, так и экспериментальные математические методы, используемые при выборе конструкторско-технологических решений и оценке их качества.

Отечественный и зарубежный опыт показывают, что применение ЭВМ для целей автоматизации инженерных расчетов способствует повышению технического уровня изделий, так как на ЭВМ можно смоделировать и просчитать большое число альтернативных конструкторских и технологических вариантов и выбрать из множества вариантов лучший (оптимальный или близкий к оптимальному). Кроме того, применение ЭВМ позволяет сократить сроки разработки РЭУ и освоения их в производстве.

Для автоматизации инженерных расчетов, основанных на математических (теоретических) методах, инженер должен понять и осмыслить эти методы. Поэтому основная цель книги изложить учебный материал в форме, доступной для понимания и осмысливания студентам, получившим начальную подготовку по радиоэлектронике, языкам программирования для ЭВМ, теории вероятностей и математической статистике в объеме, предусмотренном учебным планом специальности "Проектирование и производство радиоэлектронных средств".

# Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРОВ. СИСТЕМНЫЕ МЕТОДЫ В КОНСТРУИРОВАНИИ И ТЕХНОЛОГИИ РЭУ

## 1.1. Выходные и первичные параметры

Все физические величины, характеризующие объект, процесс или внешнюю среду, в технике называются *параметрами*. Применительно к РЭУ различают выходные и первичные параметры.

*Выходной параметр* характеризует меру функций, для выполнения которых предназначена конструкция РЭУ или технологический процесс. Все другие параметры конструкции или технологического процесса, а также параметры внешней среды, которые в той или иной степени влияют на выходной параметр, называют *первичными* (иногда входными) *параметрами*.

Например, для неинвертирующего источника высокостабильного (опорного) напряжения, выполненного с использованием операционного усилителя  $DA1$  (рис. 1.1), в качестве выходного параметра может рассматриваться выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ .

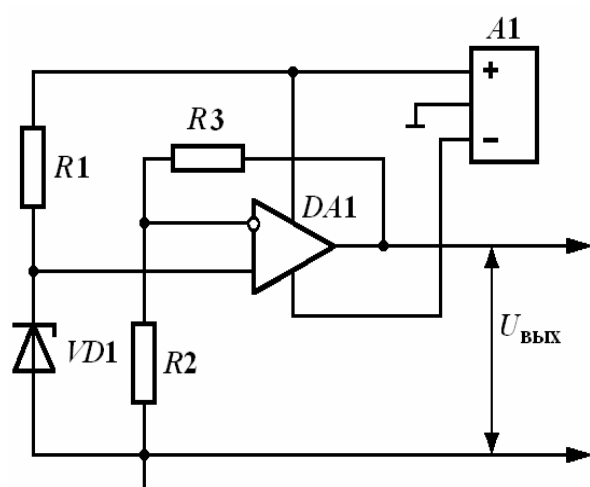


Рис.1.1 Источник опорного напряжения

Первичными параметрами в этом случае являются параметры резисторов  $R1-R3$ , напряжение стабилизации стабилитрона  $VD1$ , напряжение источника питания  $A1$ , возможно, параметры операционного усилителя  $DA1$  (коэффициент усиления, входное сопротивление и т.д.) и параметры окружающей среды.

Устройство (конструкция) или технологический процесс могут характеризоваться в общем случае совокупностью выходных параметров. Для усилителя звуковых частот это, например, выходная мощность, коэффициент усиления по мощности, коэффициент нелинейных искажений, диапазон воспроизводимых частот и т.д. В зависимости от решаемой инженерной задачи может рассматриваться один или несколько выходных параметров.

Заметим, что каждый элемент РЭУ в общем случае может описываться совокупностью первичных параметров. Однако в зависимости от физической сущности рассматриваемого выходного параметра РЭУ во внимание могут приниматься один (резисторы,

конденсаторы и т.п.) или несколько (транзисторы, интегральные микросхемы, диоды) первичных параметров.

В ряде случаев [1, 2] вместо термина первичные параметры пользуются понятиями внутренние и внешние параметры, которые могут рассматриваться как разновидности первых. Под *внутренними* и *внешними* понимают параметры, характеризующие соответственно составные части РЭУ (технологического процесса) и внешнюю по отношению к нему среду. Например, если для источника опорного напряжения (рис. 1.1) в качестве выходного параметра рассматривать напряжение  $U_{\text{вых}}$ , то внутренними параметрами будут сопротивления резисторов  $R1-R3$ , напряжение стабилизации стабилитрона  $VD1$ , и, теоретически, параметры операционного усилителя, а внешними — сопротивление нагрузки, напряжение источника питания  $A1$ , температура окружающей среды и др.

В дальнейшем внутренние и внешние параметры обобщенно будем называть первичными.

Употребление терминов "выходной" и "первичный" параметры в известной степени носит условный характер и зависит от уровня структурной единицы конструкции РЭУ или технологического процесса. Например, выходные параметры каскадов и функциональных узлов могут рассматриваться как первичные параметры для блоков, а выходные параметры блоков — как первичные для радиоэлектронного аппарата в целом.

## 1.2. Конструкторские параметры

В конструировании РЭУ широко пользуются таким понятием, как конструкторские параметры устройства. Основными конструкторскими параметрами являются: а) масса; б) габариты; в) полезное использование массы; г) полезное использование объема; д) полезное использование площади.

Полезное использование объема описывают с помощью коэффициента заполнения по объему  $K_V$ , который можно подсчитать по формуле

$$K_V = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{V}, \quad (1.1)$$

где  $n$  — количество элементов в устройстве;

$v_i$  — объем  $i$ -го элемента;

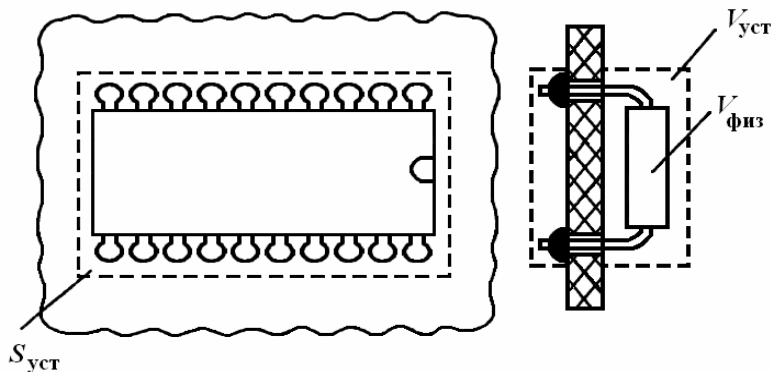
$V$  — общий объем РЭУ (определяется объемом корпуса).

В инженерной практике различают коэффициент заполнения по установочным объемам и коэффициент заполнения



по физическим объемам в зависимости от того, какие объемы элементов (установочные или физические) подставляются в выражение (1.1).

Физический объем  $i$ -го элемента  $V_{\text{физ}i}$  — это такой объем, который равен объему вытесненной этим элементом жидкости.



**Рис.1.2. К пояснению физического и установочного объемов**

Установочный объем  $V_{\text{уст}i}$  — это объем, необходимый для установки и монтажа элемента в устройстве (рис. 1.2).

Как правило, всегда справедливо соотношение

$$V_{\text{уст}i} > V_{\text{физ}i}.$$

В силу трудности определения  $V_{\text{физ}i}$  в инженерной практике обычно пользуются установочными объемами  $V_{\text{уст}i}$ . Значения  $V_{\text{уст}i}$  приводятся в справочной литературе [3], либо могут быть подсчитаны аналитически.

Значения коэффициентов заполнения по объему для некоторых видов РЭУ приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения коэффициентов  $K_V$

Характеристика РЭУ (функциональное назначение)	Категория или группа РЭУ		
	стационарная	возимая	бортовая
1. Радиопередающая	0,2	0,4	0,6...0,7
2. Радиоприемная	0,4	0,5	0,7...0,8
3. РЭУ цифровой обработки информации	0,7	0,7	0,8...0,9
4. Источники питания	0,5	0,6...0,7	до 1,0

В инженерной практике вместо коэффициента заполнения по объему  $K_V$  часто пользуются коэффициентом увеличения объема  $K_{\text{ув}}^V$ , определяемым как

$$K_{\text{ув}}^V = \frac{1}{K_V}. \quad (1.2)$$

Значение коэффициента  $K_{\text{ув}}^V$ , выбирают равным 1,2...5 [3].

По аналогии с объемом может быть введено понятие коэффициента заполнения по массе ( $K_M$ ), а для печатных плат и

коэффициента заполнения по площади ( $K_s$ ). Эти коэффициенты могут быть подсчитаны по формулам

$$K_M = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{M}, \quad (1.3)$$

$$K_S = \frac{\sum_{i=1}^n S_{уст i}}{S}, \quad (1.4)$$

где  $m$  — масса  $i$ -го элемента;  
 $S_{уст i}$  — установочная площадь  $i$ -го элемента (см. рис. 1.2);  
 $M$  — суммарная масса РЭУ;  
 $S$  — общая площадь платы, на которой устанавливаются элементы;  
 $n$  — количество элементов в РЭУ.

В инженерной практике вместо коэффициентов  $K_M$  и  $K_S$  пользуются коэффициентом увеличения массы ( $K_{ув}^M$ ) и коэффициентом увеличения поверхности платы ( $K_{ув}^S$ ). Коэффициенты  $K_{ув}^M$  и  $K_{ув}^S$  являются обратными величинами коэффициентов  $K_M$  и  $K_S$ , т.е.

$$K_{ув}^M = \frac{1}{K_M}, \quad (1.5)$$

$$K_{ув}^S = \frac{1}{K_S}. \quad (1.6)$$

При проектировании РЭУ коэффициенты увеличения используют со следующими численными значениями:

а) коэффициент  $K_{ув}^M$  — от 1,1 до 3... 5;

б) коэффициент  $K_{ув}^S$  — от 1,5 до 3.

Опишем, как пользоваться на практике коэффициентом увеличения на примере коэффициента увеличения поверхности (площади) печатной платы  $K_{ув}^S$ .

Предположим, что согласно электрической принципиальной схеме РЭУ выбраны типы всех  $n$  элементов. По справочным таблицам [3] находим установочные площади этих элементов,  $S_{уст i}$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Далее подсчитываем значение величины

$$\sum_{i=1}^n S_{уст i}.$$

Пусть значение этой величины равно  $30 \text{ см}^2$ . Выбираем значение коэффициента увеличения поверхности печатной платы  $K_{ув}^S$ .

Примем 
$$K_{ув}^S = 2.$$

Тогда площадь печатной платы  $S_{пл}$ , на которой будут размещены элементы, определится как

$$S_{пл} = K_{ув}^S \sum_{i=1}^n S_{уст i} = 2 \cdot 30 = 60 \text{ см}^2.$$

В технической литературе коэффициенты вида  $K_M$  и  $K_S$  употребляют также и под другими названиями, например, коэффициент использования по массе и площади.

Рассмотренные выше конструкторские параметры РЭУ называют также компоновочными параметрами.

Для функциональных узлов РЭУ часто пользуются понятиями "количество деталей в единице объема" ( $N$ ) и "количество функций в единице объема" ( $f$ ).

$$N = \frac{n}{V}; \quad (1.7)$$

$$f = \frac{F}{V}, \quad (1.8)$$

где  $n$  — общее количество элементов данного устройства;

$F$  — количество функций данного устройства;

$V$  — объем РЭУ.

Характеристику  $f$  обычно используют для функциональных узлов устройств цифровой обработки информации.

### 1.3. Единичные и комплексные показатели качества

Совокупность свойств РЭУ, обуславливающих пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его функциональным назначением, составляет качество РЭУ.

Для оценки качества РЭУ используют *показатели качества*, под которыми понимают количественные характеристики одного или нескольких свойств РЭУ, рассматриваемые применительно к определенным условиям его создания и эксплуатации.

Качество РЭС является многогранным свойством. Для описания различных сторон этого свойства используют единичные показатели качества.

Основными единичными показателями качества являются:

1) выходные электрические параметры;

- 2) масса;
- 3) габариты;
- 4) надежность;
- 5) ресурс;
- 6) стоимость;
- 7) художественное оформление (дизайн);
- 8) технологичность;
- 9) удобство в эксплуатации и обслуживании.

Не все единичные показатели могут быть выражены количественными мерами. Многие показатели находятся в противоречивой связи, т.е. с улучшением одного из показателей ухудшается другой. Например, возрастание надежности РЭУ влечет за собой повышение стоимости.

Часто о качестве РЭУ судят не по абсолютным, а по относительным показателям. Например, вновь разработанное РЭУ сравнивают с существующим прототипом, либо с каким-либо образцом, принятым за эталон.

Указанные обстоятельства затрудняют комплексную оценку качества модернизированных и вновь разработанных устройств.

Для выхода из положения используют комплексные показатели качества. Эти показатели обобщенно учитывают важнейшие единичные показатели качества.

Комплексный показатель качества, в отличие от единичного, характеризует несколько свойств РЭУ (как минимум два каких-то свойства).

В инженерной практике популярностью пользуются следующие модели (выражения) комплексного показателя качества:

$$K = \sum_{i=1}^m \alpha_i k_i; \quad (1.9)$$

$$K = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m k_i^{\alpha_i}}, \quad (1.10)$$

где  $k_i$  — нормированное (безразмерное) значение  $i$ -го единичного показателя;

$\alpha_i$  — коэффициент, характеризующий вес (значимость, важность)  $i$ -го единичного показателя для данного вида РЭУ;

$m$  — количество единичных показателей, принятых во внимание.

Весовые коэффициенты  $\alpha_i$  зависят от функционального назначения устройства и устанавливаются обычно с позиции заказчика, используя, например, метод экспертных оценок.

Коэффициенты  $\alpha_i$  обычно выбирают так, чтобы обеспечивалось одно из условий

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1; \quad \prod_{i=1}^m \alpha_i = 1. \quad (1.11)$$

Для получения нормированных безразмерных значений единичных показателей могут использоваться, например, такие выражения:

$$k_i^0 = \frac{k_i - k_i^*}{k_{i \text{ опт}} - k_i^*}; \quad k_i^0 = \frac{k_i}{k_{i \text{ ср}}}; \quad k_i^0 = \frac{k_i}{k_{i \text{ max(min)}}}, \quad (1.12)$$

где  $k_i^0$  — нормированное значение  $i$ -го единичного показателя;  
 $k_i$  — текущее значение  $i$ -го единичного показателя;  
 $k_i^*$  — критическое значение  $i$ -го единичного показателя с точки зрения потребительских свойств РЭУ;  
 $k_{i \text{ опт}}$  — оптимальное значение  $i$ -го единичного показателя качества;  
 $k_{i \text{ max(min)}}$  — максимальное или минимальное значение  $i$ -го единичного показателя качества.

С практическим использованием комплексных показателей качества вида (1.9) и (1.10) применительно к интегральным микросхемам и микросборкам можно ознакомиться в работах [4, 5].

Стандарт (ГОСТ 15467-79) кроме комплексного показателя качества устанавливает еще так называемый интегральный показатель качества. Он представляет собой отношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации РЭУ к суммарным затратам на его создание и эксплуатацию.

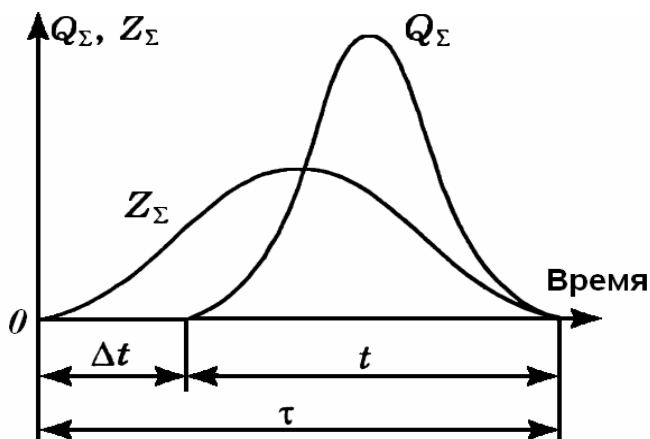
Интегральный показатель качества может быть также определен, например, в виде

$$I = \frac{Q_\Sigma}{Z_\Sigma}, \quad (1.13)$$

где  $Q_\Sigma$  — полная целевая отдача РЭУ данного типа за период эксплуатации;  
 $Z_\Sigma$  — сумма затрат (издержек) на достижение полной целевой отдачи.

Важное значение для оценки уровня качества РЭУ имеет распределение полной целевой отдачи и суммы затрат во времени (рис. 1.3).

Полная целевая отдача  $Q_\Sigma$  зависит от многих технических и организационных факторов: подготовки парка РЭУ, условий их



**Рис. 1.3** Распределение во времени полной целевой отдачи и затрат:  
 $t$  — время достижения полной целевой отдачи;  $\Delta t$  — время проектирования, изготовления и подготовки к применению РЭУ;  
 $\tau$  — период времени расходования средств.

эксплуатации, квалификации обслуживающего персонала и др. И все это изменяется во времени.

Затраты на достижение полной целевой отдачи зависят, например, от технического уровня предприятия, форм и методов организации производства, специализации и кооперирования, профессиональной подготовленности кадров, технологичности конструкции РЭУ и др. Здесь также сказыва-

ется влияние фактора времени.

От правильного построения математических моделей (выражений) для величин  $Q_\Sigma$  и  $Z_\Sigma$  зависит правильность интегральной оценки качества РЭУ. На практике обычно сложно получить не только модели для расчета  $Q_\Sigma$  и  $Z_\Sigma$ , но иногда не ясно, через какие параметры выражать полную целевую отдачу.

В реальных условиях не менее трудно подсчитать и суммарные затраты  $Z_\Sigma$ .

Вместе с тем общность интегрального показателя качества вида (1.13) облегчает его применение к конкретным условиям.

## 1.4. Методы оценки уровня качества

Для оценки уровня качества РЭУ на практике широко используют следующие методы: дифференциальный; комплексный; смешанный; статистический.

Дифференциальный метод основан на использовании единичных показателей качества РЭУ.

Комплексный метод основан на использовании комплексных показателей качества, важным вопросом здесь является учет тех единичных показателей, которые не могут быть явно выражены количественными мерами, например, художественное оформление (дизайн) или удобство в техническом обслуживании. Для учета подобных единичных показателей пригодны методы экспертных оценок. В этих методах единичному показателю дает независимую оценку (например, в баллах) группа специалистов-экспертов. Результирующую окончательную оценку обычно получают путем

усреднения. В простейшем случае подсчитывают среднее арифметическое значение по формуле

$$k = \frac{\sum_{j=1}^n k_j}{n}, \quad (1.14)$$

где  $k_j$  — численное значение оценки, сделанное  $j$ -м экспертом;  
 $n$  — число экспертов, участвующих в процедуре экспертной оценки единичного показателя качества.

Лучшие результаты дает усреднение с учетом весовых коэффициентов, учитывающих значимость мнения (опыт, квалификацию, авторитет и т.п.)  $j$ -го эксперта. В этом случае используют формулу

$$k = \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j k_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j}, \quad (1.15)$$

где  $\alpha_j$  — весовой коэффициент  $j$ -го эксперта.

Смешанный метод оценки основан на одновременном использовании единичных и комплексных показателей качества РЭУ.

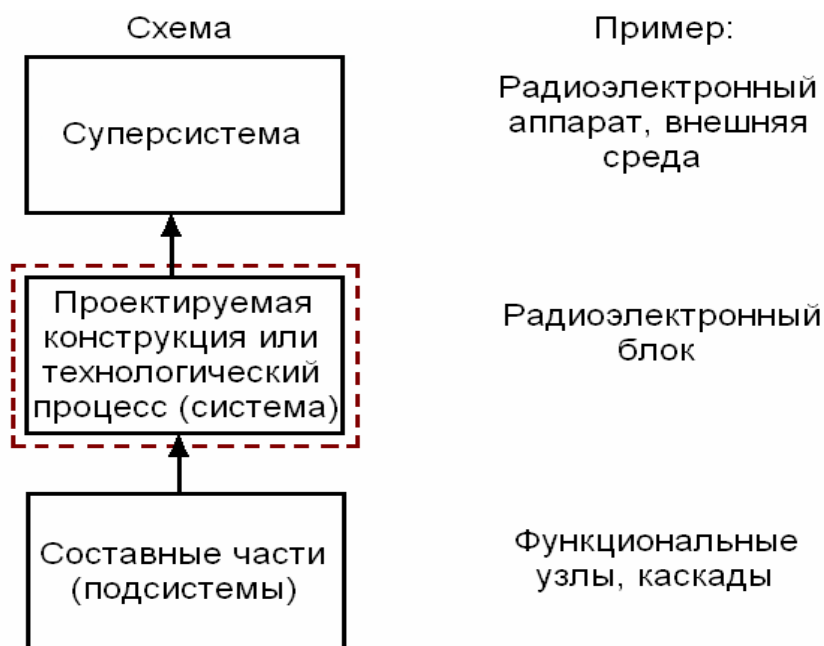
При статистических методах значение интересующего показателя качества РЭУ определяют с использованием правил математической статистики.

При решении практических задач по оценке качества РЭУ обычно прибегают к сочетанию рассмотренных методов оценки качества.

### **1.5. Суть системного подхода к проектированию конструкций и технологии**

Детальное рассмотрение конструкций и технологии РЭУ показывает, что как конструкции, так и технологические процессы проявляют признаки систем: представляют собой единое целое, состоящее из составных частей, выполняющих какую-то общую задачу. Поэтому для проектирования конструкций и технологии РЭУ применим такой же подход, как и при проектировании систем. Он получил название системного подхода.

Опыт проектирования показывает, что использование системного подхода позволяет достичь более высоких качественных показателей конструкций и технологических процессов, нежели при рецептурном принципе проектирования.



**Рис.1.4. К понятию системного подхода**

Характерной особенностью рецептурного подхода к проектированию является использование указаний (рекомендаций, рецептов) отраслевых стандартов, нормалей и других технических документов.

В самом общем виде системный подход к проектированию заключается в учете на всех этапах проектирования связи, отражаемой схемой, показанной на рис. 1.4.

Рассмотрим основные черты системного подхода применительно к проектированию конструкций:

1) необходимость рассмотрения альтернативных вариантов, которые предположительно могут привести к получению сопоставимых результатов. Это, прежде всего, касается выбора источников энергии, используемых материалов, компоновочных схем, комплектующих изделий. Выбранные решения должны наиболее адекватно удовлетворять требованиям к конструкции;

2) оценка качества конструкции не только основываясь на общепринятых показателях, таких, как выходные параметры, стоимость, время разработки, удобство в обслуживании, надежность и т.п., но и количественная оценка значения комплексного (интегрального) показателя качества;

3) учет того, что конструкция РЭУ функционирует во внешней среде и в действительности является подсистемой некоторой другой системы (суперсистемы). Решения, принимаемые при разработке конструкции РЭУ на любой стадии, обусловлены внешней средой, которая выступает в виде следующих факторов: физическое окружение; уровень науки и техники; форма структуры



проектной организации; квалификация, опыт и интеллект персонала; время разработки; дополнительные факторы;

4) исследование эффективности конструкторских решений на основе моделирования без использования устройств;

5) использование вероятностно-статистических методов при оценке решений, на результат которых влияют случайные параметры;

6) широкое использование ЭВМ и современного математического аппарата при оценке пригодности конструкторских решений.

По аналогии с конструкциями может быть рассмотрен системный подход применительно к проектированию технологии [6].