


ПОГРЕШНОСТИ
ТОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ ОЭП
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОЭП



Точностные критерии качества ОЭП

Одним из важнейших критериев качества ОЭП является **точность**, определяемая потерями информации, которые приводят к погрешностям средств измерений и контроля.

Обеспечение заданной точности измерения - одна из главных задач, встающих перед разработчиком при проектировании ОЭП.

Решение ее достигается путем расчета основных метрологических параметров ОЭП и сопоставления их с требованиями технического задания.

Результаты точностных расчетов помогают определить требования к отдельным узлам прибора, допуски на погрешности их изготовления и сборки, допуски на параметры и характеристики элементов ОЭП и многие другие.

От того, насколько правильно будут решены вопросы выявления и учета погрешностей, назначения допусков, зависят показатели качества информации, передаваемой ОЭП, его технологичность и надежность.

В обобщенном случае схему функционирования ОЭП можно представить в виде, показанном на **рис. 1**, где:

- x_{0i}, x_i, y_i – i -е информативные параметры объекта, входного и выходного сигналов соответственно;
- q_i – i -й схемный (конструктивный) параметр прибора;
- f_i – функция, связывающая x_i и y_i ;
- $\Phi Y_1, \Phi Y_2, \dots, \Phi Y_n$ – функциональные устройства прибора;
- q'_j – влияющие факторы;
- f'_i – функция, связывающая y_i с x_{0i} .

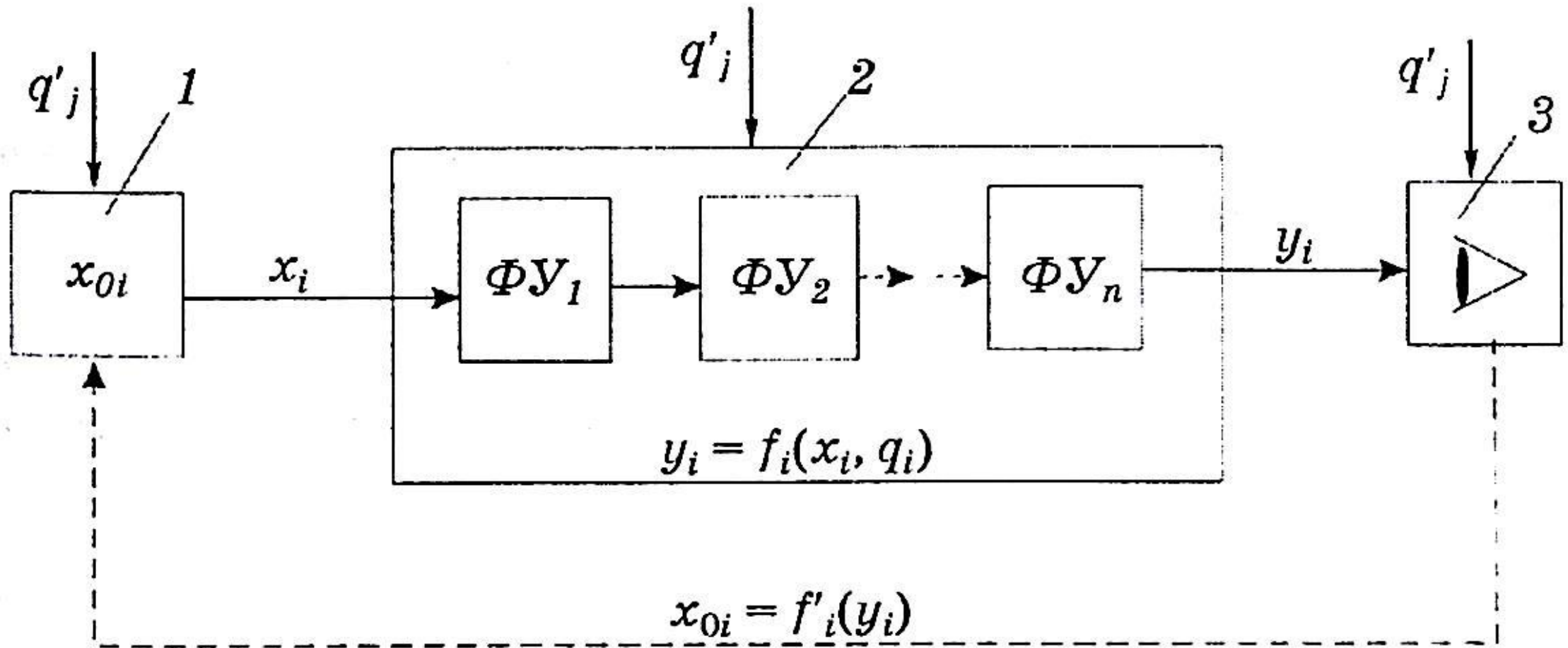


Рис. 1. Схема функционирования опико-электронного прибора:
 1- объект наблюдения; 2 - ОЭП; 3 - оператор (устройство управления, регулирования)

Процесс функционирования ОЭП сопровождается **погрешностями** (потерей информации), которые характеризуют точность результата функционирования, т.е. точность измерения, управления или обнаружения, осуществляемого прибором.

В общем случае погрешность результата функционирования прибора обусловлена потерей информации, возникающей **до преобразования** входного сигнала в приборе, непосредственно **в процессе преобразования** и при **регистрации и обработке результатов**.

методические и инструментальные погрешности

Погрешности из-за **потери информации до преобразования** ее в приборе, а также **при регистрации и обработке**, называют обычно **методическими погрешностями**.

Погрешности, обусловленные **потерей информации** в оптических, механических, электронных и других ФУ прибора, **осуществляющих преобразование** информативного параметра входного сигнала в информативный параметр выходного сигнала, называют **инструментальными** (аппаратурными, приборными).

Методические погрешности.

Методические погрешности обусловлены ошибочностью или недостаточностью разработки принятой теории метода функционирования прибора в целом, допущениями в отношении объекта, сигнала или канала прохождения сигнала, неправильной ориентировкой прибора относительно объекта, дискретностью представления информации и т. п.

Методические погрешности, связанные с допущениями, особенно характерны для измерительных приборов, принцип действия которых основан на косвенных методах измерения.

Рассмотрим два примера.

Пример 1 (рис. 2).

В функции, заложенной в основу работы импульсных светодальномеров (рис. 2)

$$D = \frac{ct}{2n}$$

предполагается, что n на трассе измерения постоянен и равен некоторому конкретному значению.

(где D – дистанция до объекта; c – скорость света в вакууме; t – время прохождения излучения до объекта и обратно; n – показатель преломления среды).

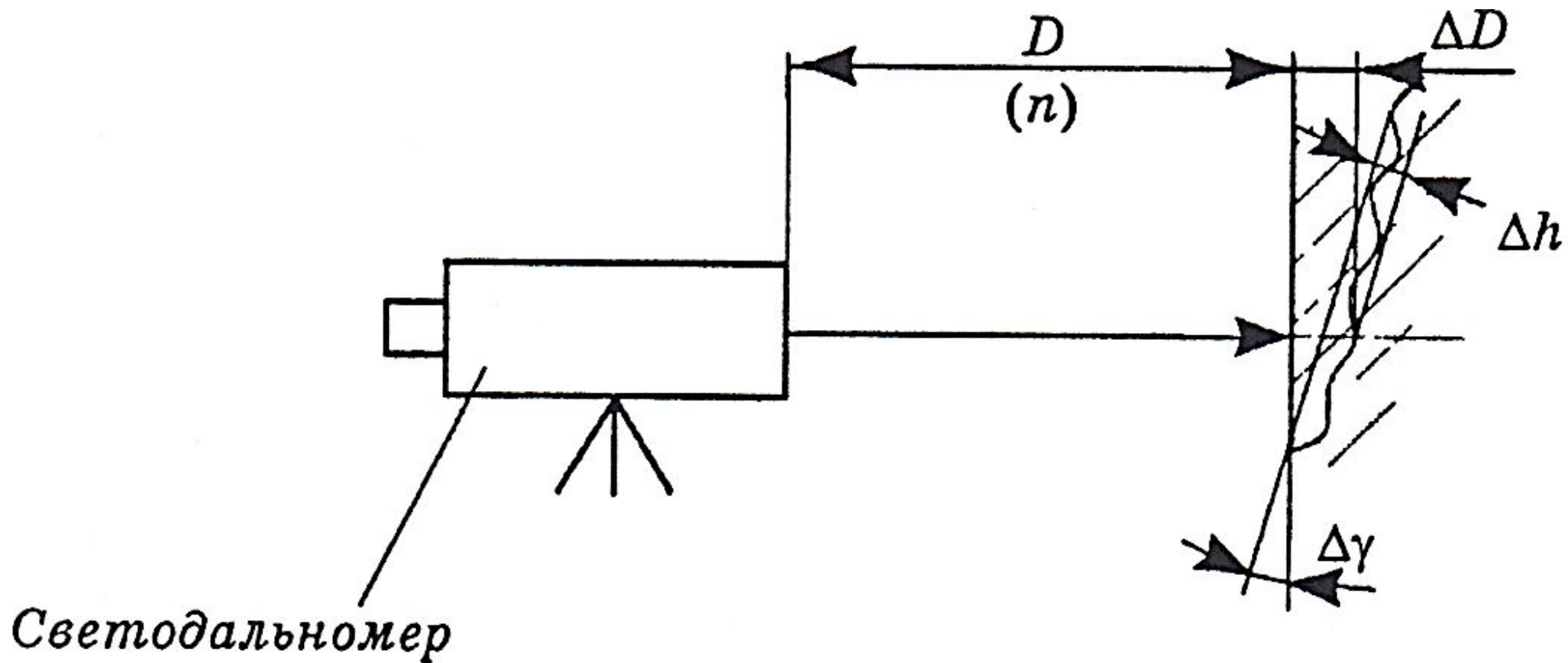


Рис. 2. Схема работы светодальномера

При реальных измерениях значение этого параметра (n) известно только приблизительно, к тому же он изменяется на различных участках трассы, что приводит к **методической** погрешности измерения дистанции:

$$\Delta D_{\Delta n} = - \left(\frac{ct}{2n^2} \right) \Delta n = - \left(\frac{D}{n} \right) \Delta n$$

К методическим погрешностям измерения дистанции будут относиться также погрешности, обусловленные наклоном $\Delta \gamma$ и неровностями (шероховатостью) Δh формы поверхности объекта.

Пример 2 (рис. 3).

В том случае, когда в основу функционирования нивелира **1 (рис. 3)** положено допущение о прямолинейном распространении пучка лучей от прибора до объекта (рейки **2**) к **методической погрешности** следует отнести погрешность (ΔH) измерения высоты из-за рефракции воздушных слоев, приводящих к искривлению линии визирования.

Например: на 100 м ΔH может достигать 1-2 мм.

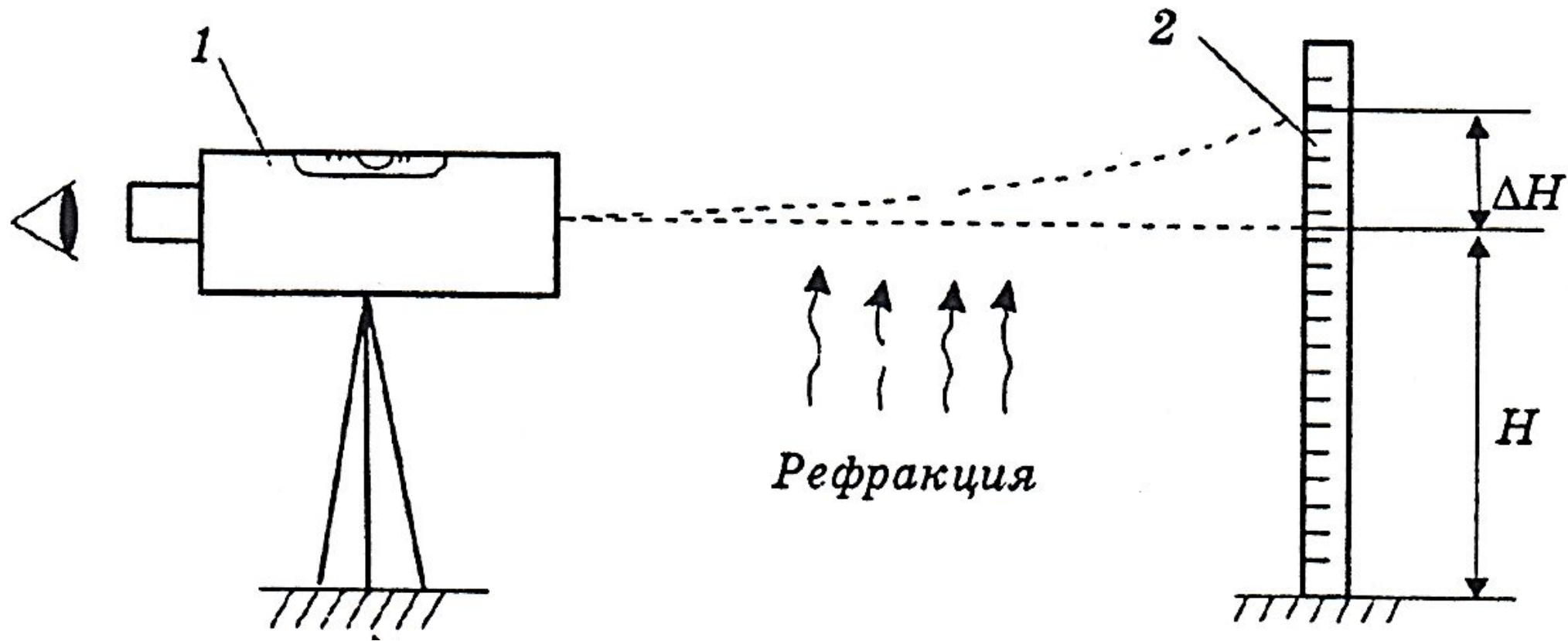


Рис. 3. Схема работы нивелира

Отличительной особенностью **методических погрешностей** является то, что они обязательно связаны с результатом функционирования прибора (измерения, управления, обнаружения объекта) и определяются путем создания математической модели или имитационным моделированием метода и объекта, а не могут быть найдены только исследованием самого прибора.

Инструментальные погрешности

Инструментальные погрешности подразделяются на **теоретические, технологические и эксплуатационные.**

Теоретические погрешности обусловлены тремя видами допущений:

- **структурными** – допущениями в законе функционирования прибора, в функции f_i , связывающей информативные параметры входного x_i , и выходного y_i сигналов;

- **параметрическими** – допущениями в значениях конструктивных параметров q_i ;
- **конструктивными** – допущениями в конструкциях высших кинематических пар.

Теоретические погрешности первого вида (структурные, схемные) возникают при замене точной функции преобразования сигнала приближенной зависимостью.

Чаще всего это происходит, когда вместо нелинейной функции пользуются ее линейным приближением.

Теоретические погрешности второго вида (параметрические) обусловлены округлениями конструктивных параметров до значений, нормируемых стандартами.

Например, при расчетах радиусов кривизны поверхностей оптических деталей необходимо округлять полученные значения до ближайших радиусов по **ГОСТ 1807-75**. В результате несколько изменяются исходные (или искомые) характеристики оптических систем.

Теоретические погрешности третьего вида (конструктивные) обычно возникают при конструировании высших кинематических пар кулачковых и рычажных механизмов.

Технологические погрешности возникают в процессе изготовления и сборки элементов ОЭП и могут быть следующими:

- **отклонения от расчетных значений характеристик материалов деталей** (например, показателя преломления и средней дисперсии стекла, модуля упругости, коэффициента линейного расширения);

- **погрешности размеров и форм деталей**, возникающие при их изготовлении (например, погрешности радиусов кривизны и формы рабочих поверхностей линз, клиновидности призм, погрешности деления шкал, погрешности форм поверхностей направляющих);
- **погрешности расположения и деформации деталей**, возникающие при их сборке (например, децентрировки и деформации линз, перекосы шкал)

К **технологическим погрешностям** часто относят погрешности параметров и характеристик покупных (стандартизованных, унифицированных) элементов и блоков (подшипников, приемников, шаговых двигателей, датчиков, АЦП), так как их погрешности обусловлены комплексными дефектами изготовления.

Однако если значения этих погрешностей известны (паспортизованы) и могут быть приписаны конкретным значениям информативного параметра выходного сигнала y_i прибора, то их относят к теоретическим погрешностям.

Технологические погрешности – это один из самых многочисленных и наиболее сильно влияющих на точность функционирования и качество изображения ОЭП источников погрешностей.

Эксплуатационные погрешности возникают из-за воздействия на ОЭП внешних и внутренних влияющих факторов: нагрузок, вибраций, сил трения, температуры, давления, влажности, радиационного излучения, электромагнитных полей, нестабильности источников питания и т.д.

Влияние этих факторов приводит:

- к изменению характеристик материалов (например, показателя преломления стекла при изменении температуры);
- к изменению размеров, формы и положения деталей (например, радиусов и формы кривизны поверхностей, диаметров линз, длин плеч рычагов, значений воздушных промежутков между оптическими деталями);

- к изменению характеристик и параметров покупных изделий (например, чувствительности приемников, излучательной способности источников излучения).

Отличительной особенностью инструментальных погрешностей является то, что они могут быть измерены (исследованы) и занесены в паспорт прибора (устройства).

Все погрешности можно классифицировать различным образом:

- по размерности - **абсолютные и относительные;**
- по характеру связи с измеряемой величиной – **аддитивные, мультипликативные;**
- по закономерности появления - **систематические и случайные;**

- по причинам появления - **методические и инструментальные**;
- по условиям появления - **статические и динамические**.

Абсолютная погрешность измерений - разность между измеренным и истинным (действительным) значениями измеряемой величины.

Относительная погрешность - отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой величины и она выражается в процентах или долях измеряемой величины.

Аддитивная погрешность - погрешность, постоянная в каждой точке шкалы.

Мультипликативная погрешность - погрешность, линейно возрастающая или убывающая с ростом измеряемой величины.

Случайная погрешность - это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Систематическая погрешность - составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Статическая погрешность измерений - погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения, то есть при измерении постоянных величин после завершения переходных процессов в элементах приборов и преобразователей.

Динамическая погрешность измерений - погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения. Динамическая погрешность появляется при измерении переменных величин и обусловлена инерционными свойствами средств измерений.

Рассмотрим **классификацию погрешностей** в зависимости от их причинно-следственной структуры и свойств. Причинно-следственная структура погрешностей прибора (устройства) приведена на **рис. 4**.

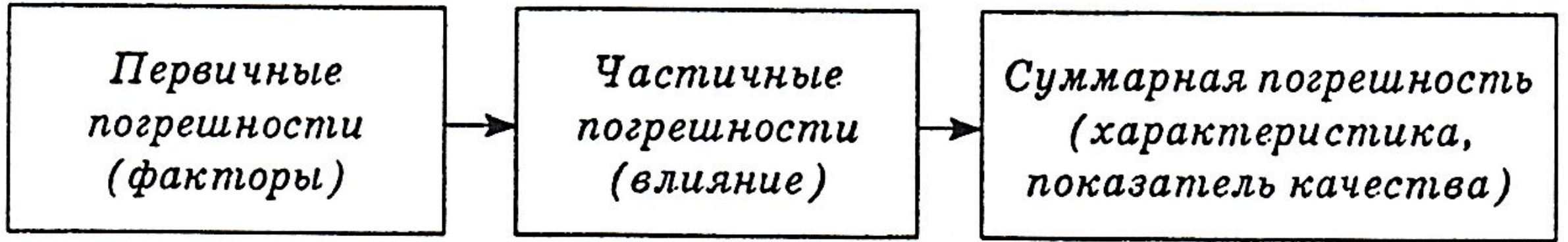


Рис. 4. Причинно-следственная структура погрешностей прибора

Первичные погрешности и факторы представляют собой:

- отклонения (Δq) от номинальных значений конструктивных параметров и характеристик деталей (размеров, формы, расположения, характеристик материалов) и сборочных единиц;
- изменения ($\Delta q'$) влияющих факторов (например, освещенность, температура, внешний шум);

- отклонение (Δf) от расчетного значения функции преобразования сигнала (например, отклонение от синусоидального или квадратичного);
- отклонения (Δx) информативного параметра сигнала, поступающего на вход прибора, от его номинального значения из-за методических допущений (например, в дальномере искажение формы импульса при его отражении от мишени и распространении в атмосфере).

Первичные факторы $\Delta q'$ приводят к изменению конструктивных параметров и характеристик деталей и сборочных единиц, т.е. они оказывают влияние на точность прибора через Δq .

При этом один первичный фактор (**например, изменение температуры может приводить к изменению фокусного расстояния объектива за счет температурных деформаций линз и изменению расстояния между ними**) может действовать на изменение как одного, так и нескольких конструктивных параметров и характеристик одновременно.

Каждая отдельная первичная погрешность и фактор влияют на точность прибора.

Это влияние (т.е. единичное действие первичной погрешности или фактора на информативный параметр выходного сигнала, а стало быть, и на характеристику точности) называется **частичной (частной) погрешностью (частичным влиянием)** и обозначается:

$$\Delta u_{\Delta q}, \Delta u_{\Delta q'}, \Delta u_{\Delta f}, \Delta u_{\Delta x}$$

Частичная погрешность (в общем случае) равна произведению первичной погрешности Δq на некоторую функцию Aq :

$$\Delta y_{\Delta q} = Aq \Delta q$$

Эта функция, связывающая частичную погрешность с первичной погрешностью или фактором, может быть в общем виде как линейной, так и нелинейной и называется **передаточной функцией (коэффициентом влияния) первичной погрешности (фактора)**.

Частичные погрешности, суммируясь, образуют **суммарную погрешность прибора (устройства)** Δy_{Σ} .

В общем случае можно считать, что **суммарная погрешность** (показатель качества) равна **алгебраической сумме частичных погрешностей**

$$\Delta y_{\Sigma} = \sum_i^n \Delta y_{\Delta q_i}$$

где n – число частичных погрешностей.

Определяющий номенклатуру основных метрологических характеристик **ГОСТ 8.009-84 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерения»** регламентирует разделение **инструментальной погрешности** на следующие составляющие:

- **основную**, обусловленную неидеальностью отдельных звеньев прибора (например, наличием люфтов...), что приводит к отклонению от идеальной реальной функции преобразования - зависимости выходного сигнала от входного, характерной для нормальных (стандартных) условий работы ОЭП;

- **дополнительную**, вызванную реакцией прибора на изменения внешних влияющих факторов и неинформативных параметров входного сигнала относительно их номинальных значений.
- **динамическую**, обусловленную реакцией прибора на скорость или частоту изменения входного сигнала. Она, как и основная погрешность, зависит от свойств отдельных звеньев прибора, например от их инерционности.

Первые две составляющие образуют **статическую погрешность**.

На практике часто удобно из общей погрешности выделить следующие составляющие:

- **методическую.** В основном методическая погрешность носит систематический характер, однако в общем случае она содержит и случайную составляющую, оцениваемую, например, дисперсией $\sigma_{\text{мет}}^2$. Часто эту оценку можно учесть с достаточно высокой достоверностью;

- **инструментальную.** Ряд факторов, определяющих инструментальную погрешность, носит систематический характер, другие - случайный, причем некоторые из последних выделяются в отдельную составляющую. Опыт, накопленный оптико-электронным приборостроением, позволяет с достаточной достоверностью рассчитывать и учитывать как систематическую, так и случайную составляющую (например, дисперсию $\sigma_{\text{И}}^2$) инструментальной погрешности;

- **динамическую**, обусловленную инерционностью ОЭП и отдельных его звеньев. Случайная составляющая динамической погрешности может быть оценена дисперсией $\sigma_{\text{дин}}^2$;
- **флуктуационную**, к которой относят часть случайных составляющих инструментальных погрешностей, например возникающих вследствие шумов приемника излучения и электронных звеньев ОЭП, а также случайные составляющие, вызванные внешними помехами и шумами. Обозначим дисперсию флуктуационной погрешности через $\sigma_{\text{фл}}^2$.

Здесь **динамическая** и **флуктуационная** (обусловленная шумами и помехами внутреннего и внешнего происхождения) составляющие выделены из **общей** инструментальной погрешности.

Очень важно правильно учесть характер взаимодействия отдельных составляющих суммарной погрешности прибора или измерения.

Допустим, что систематическая составляющая инструментальной погрешности может быть устранена или учтена.

Если считать, что случайные составляющие общей погрешности некоррелированы между собой и складываются квадратически, т.е. дисперсия суммарной погрешности (характеризующая случайные составляющие)

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{\text{М}}^2 + \sigma_{\text{И}}^2 + \sigma_{\text{ДИН}}^2 + \sigma_{\text{ФЛ}}^2 \quad (1)$$

где σ_{Σ}^2 , $\sigma_{\text{М}}^2$, $\sigma_{\text{И}}^2$, $\sigma_{\text{ДИН}}^2$ и $\sigma_{\text{ФЛ}}^2$ - дисперсии случайных составляющих **общей** (суммарной) погрешности и ее составляющих: **методической, инструментальной, динамической и флуктуационной.**

В этом случае иногда на стадии предварительного проектирования ОЭП с учетом известного характера и знания ориентировочных величин σ_M^2 и σ_I^2 можно выделить совокупность $\sigma_{\text{дин}}^2$ и $\sigma_{\text{фл}}^2$, т.е. для допустимого значения σ_{Σ}^2 принимать как допуск

$$(\sigma_{\text{дин}}^2 + \sigma_{\text{фл}}^2) = \sigma_{\Sigma}^2 - (\sigma_M^2 + \sigma_I^2) \quad (2)$$

и на первых этапах точностного расчета ОЭП определять составляющие $\sigma_{\text{дин}}^2$ и $\sigma_{\text{фл}}^2$.

ТОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ ОЭП

При разработке новых ОЭП или при оценке точностных возможностей уже созданных ОЭП в условиях эксплуатации, существенно отличающихся от прежних, т.е. при априорной неопределенности отдельных составляющих погрешностей, целесообразно провести точностной расчет прибора в несколько этапов.

Первым этапом точностного расчета для вновь разрабатываемого ОЭП может являться расчет его **потенциальной точности**, т.е. точности оптимальной системы, характеризующей идеализированную измерительную схему без учета структуры ОЭП, свойств его звеньев (методических, инструментальных, динамических и флуктуационных погрешностей, определяемых параметрами и характеристиками звеньев ОЭП) и часто обусловленной лишь свойствами принимаемого сигнала и внешних помех.

Значение погрешности, определяющей **потенциальную точность**, характеризует предельно достижимое качество измерений (для выбранной идеализированной измерительной схемы), а также задает тот предел, к которому может стремиться разработчик прибора.

Если значение этой погрешности превышает значение, установленное **T3**, то при активном методе работы ОЭП следует просмотреть возможность изменения параметров сигнала, посылаемого передающей оптической системой к приемной, а в более общем случае постараться уменьшить влияние внешних шумов и помех.

После выбора предварительной структурной схемы прибора и значений основных параметров его звеньев необходимо рассчитать **динамические и флуктуационные** погрешности.

При этом, опираясь на опыт предшествующих разработок, иногда можно определить допустимое значение их суммы по формуле **(2)**.

Прежде чем приступить к этому расчету, обычно следует выполнить энергетические расчеты отдельных звеньев прибора. Например, зная мощность поступающего на приемник излучения, можно определить структуру электронного канала и рассчитать значение его коэффициента усиления.

Расчет **динамических и флуктуационных** погрешностей позволяет выбрать оптимальную структуру прибора, его основные параметры, подобрать корректирующие звенья. Критерием оптимизации является минимум $\sigma_{\text{дин}}^2$ и $\sigma_{\text{фл}}^2$.

Следующим этапом точностного расчета, проведение которого необходимо после разработки **реальной** конструкции прибора, является расчет **инструментальной** погрешности, включающей **динамические и флуктуационные** погрешности **реальных звеньев**, а также погрешности, обусловленные неточностью изготовления и сборки этих звеньев и действия нелинейностей типа люфтов, трения и т.п.

В том случае, когда изменяется конструкция прибора, необходим проверочный расчет точности, т.е. возвращение к предыдущему (или двум предыдущим) этапу точностного расчета.

Общая методика расчета инструментальных погрешностей

Методы расчета инструментальных погрешностей очень разнообразны и зависят от особенностей конструкции приборов, принципа их работы и технологии производства. Тем не менее, в специальной литературе содержатся общие рекомендации, определяющие отдельные этапы такого расчета.

Обычно основой расчета инструментальных погрешностей является составление уравнения погрешностей, которое выражает зависимость общей статической погрешности прибора от первичных погрешностей, свойственных отдельным его звеньям или возникающих в этих звеньях под влиянием различных внутренних или внешних факторов.

Основные этапы расчета:

- 1) анализ процесса измерения и составление структурной схемы ОЭП;
- 2) составление рабочей формулы для единичного измерения, т.е. определение функциональной связи между входным и выходным сигналами через параметры отдельных звеньев. Иногда вместо общего коэффициента передачи определяются коэффициенты передачи отдельных звеньев;

3) определение уравнений погрешностей для отдельных звеньев и приведение их к стандартной безразмерной форме;

4) разделение погрешностей на группы по законам их распределения (гауссовский, релеевский, закон Пуассона) и подбор коэффициентов перехода от предельных значений погрешностей к средним квадратическим для каждого закона; выявление систематических погрешностей;

5) составление уравнения погрешностей всего прибора суммированием погрешностей отдельных звеньев с их коэффициентами влияния (весовыми коэффициентами), зависящими от структурной схемы прибора.

Это уравнение связывает погрешность выходного сигнала (конечного результата измерения) с частными погрешностями отдельных звеньев и через них с параметрами конструкции и допусками на изготовление отдельных узлов.

В соответствии с целью расчета с помощью уравнения погрешностей либо определяется общая инструментальная погрешность прибора, либо это уравнение решается относительно одной из частных погрешностей, что позволяет установить требования к одному из звеньев прибора.

Один из наиболее сложных моментов точностного расчета - выявление источников систематических погрешностей и их учет.

Это особенно сложно сделать, если проводятся единичные измерения, хотя и в случае многократных измерений одних и тех же величин борьба с систематическими погрешностями является важнейшей задачей.

Уравнение погрешностей прибора позволяет провести анализ соотношения между частными погрешностями, окончательный выбор параметров конструкции и допусков, проверку и уточнение методики измерений для уменьшения влияния систематических погрешностей.

Очень часто после разработки конструкции прибора, его изготовления и испытаний необходимо провести дополнительный расчет на максимальное влияние систематических погрешностей, источники которых иногда выявляются лишь в процессе испытаний прибора.

Примеры применения рассмотренной методики подробно описаны в литературе, посвященной расчету и конструированию точных приборов и механизмов, проектированию конкретных типов ОЭП.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОЭП

Методы повышения качества приборов

Качество опико-электронного прибора и его подсистем определяется совокупностью простых и сложных свойств: **ТОЧНОСТЬЮ, НАДЕЖНОСТЬЮ, ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬЮ** и т. д.

Как уже говорилось в начале лекции **ТОЧНОСТЬ** является одним из важнейших критериев качества ОЭП.

Наиболее эффективно качество опико-электронного прибора может быть повышено именно в процессе проектирования.

Повысить качество ОЭП можно **технологическим, проектно-конструкторским или компенсационным методами.**

Технологический метод повышения качества

Технологический метод является традиционным приемом повышения качества ОЭП при проектировании. Он основан на том, что в новой модификации прибора:

- при конструировании ответственных деталей используют обычные материалы, но с более высокими показателями качества по сравнению с прототипом (особенно для оптических деталей);

- применяются более высококачественные покупные (унифицированные) элементы: приемники, источники, шарикоподшипники, датчики, преобразователи и т. п.
- назначаются более жесткие допуски на размеры, форму и положение деталей при их изготовлении и сборке, что обеспечивается наличием на рынке сверхточных станков, измерительного и сборочного оборудования;
- используются новые (нетрадиционные) технологии для производства оригинальных и ответственных деталей.

Технологический метод повышения качества ОЭП следует считать полезным и эффективным также в случае рационального использования уже имеющихся технологических возможностей производства.

Естественно, что технологический путь повышения качества приборов связан со значительным удорожанием производства и не всегда обеспечивает необходимое повышение качества создаваемого прибора, поэтому не может считаться оптимальным и достаточно эффективным.

К тому же развитие технологических возможностей отстает от предъявляемых требований к точности изготовления элементов и приборов и простое ужесточение допусков на их изготовление и сборку часто не дает желаемого результата.

Тем не менее неуклонное повышение качества технологического оборудования и техпроцессов, появление новых конструкционных материалов и унифицированных элементов с более хорошими характеристиками определяет возрастающую перспективность данного метода.

Проектно - конструкторский метод повышения качества

Проектно-конструкторский метод является наиболее эффективным и перспективным для повышения качества опико-электронных приборов.

Он основан:

- на рациональном перераспределении допусков и параметров;
- на изменении конструкции отдельных деталей и узлов;
- на изменении схемы, принципа функционирования прибора или его функциональных устройств.

Рациональное перераспределение допусков позволяет повысить технологичность прибора, а иногда и его показатели назначения.

Например, в объективах допуски на центрировку отдельных линз часто назначают одинаковыми и, как правило, довольно «жесткими», однако децентрировка каждой линзы влияет на величину aberrаций по-разному, поэтому целесообразно расширить допуск на центрировку линз, которые влияют слабо, и сузить допуск на те, которые влияют очень сильно.

Подобные примеры можно привести по каждому пункту предыдущего слайда.

Компенсационный метод повышения качества

Компенсационный метод повышения качества ОЭП широко используется на практике и может дать существенные результаты.

Он основан на применении специальных **технологических, организационно-технических и конструкторских** приемов и устройств (компенсаторов) с целью компенсации влияния погрешностей, ухудшающих показатели качества.

Этот метод тесно связан как с **технологическим** (в случае применения технологических методов компенсации), так и с **проектно-конструкторским** (в случае конструктивных методов компенсации) методами повышения качества приборов.

Специфика оптических приборов такова, что практически ни один прибор не выпускается без компенсаторов тех или иных погрешностей.

Рассмотрим более подробно **классификацию методов компенсации погрешностей на примере ОЭП.**

Методы компенсации погрешностей в ОЭ приборах

Технологический метод компенсации заключается в дополнительной обработке деталей прибора, а также в регулировках и юстировках в процессе сборки, с целью компенсации отклонений характеристик материалов деталей и погрешностей их изготовления и сборки.

Дополнительная обработка деталей производится, как правило, в процессе их сборки в узлы и называется **пригонкой, или доводкой**.

Доводочные операции осуществляются на металлорежущих станках либо, что чаще, слесарным способом.

Доводки бывают отдельные, когда каждая деталь подгоняется к эталону, либо совместные, когда подгоняются друг к другу сопрягаемые детали. Доводка деталей является трудоемким процессом.

Регулировки и юстировки осуществляются на завершающем этапе сборки прибора или его узлов путем подвижек деталей либо воздействием на элементы, влияющие на качество ОЭП. Регулировка и юстировка заключаются в выявлении погрешностей, подлежащих компенсации (контроль), их устранении (регулировка-юстировка) и фиксации результата.

При применении **конструктивных методов** компенсации, как правило, не обойтись без регулировок и юстировок таких компенсаторов (т. е. технологической компенсации), что указывает на некоторую условность классификации этих методов.

Таким образом под **технологической компенсацией** будем понимать только дополнительную обработку деталей.

Данный метод применяется широко, когда требуется получить высокую надежность компенсации, а также тогда, когда другие методы использовать невозможно.

В остальных случаях экономически выгоднее применять **организационно-технический или конструктивный** методы компенсации.

Организационно-технический метод компенсации заключается, например, в **селекции деталей**, во введении поправок, пересчете оптической системы прибора на плавки стекол (пересчет для исправления аберраций на фактические значения показателя преломления и средней дисперсии конкретной партии стекла с дальнейшей комплектацией деталей по толщинам и воздушным промежуткам).

При **селекции** из партии деталей, поступающих на сборку, выбирают такие, которые дают нужное сочетание друг с другом, например, нужную посадку, нужную толщину, длину, расположение и т.п.

Несмотря на некоторые недостатки **метода селекции** (возможность незавершенного производства, дополнительные затраты на сортировку, нарушение принципа полной взаимозаменяемости), данный метод позволяет компенсировать неблагоприятные сочетания погрешностей изготовления деталей, расширить допуски на точность изготовления их размеров.

Для компенсации влияния некоторых погрешностей применяются также чисто **организационные методы**. Например, для компенсации погрешности от мертвого хода рекомендуется производить отсчетные перемещения подвижных систем прибора всегда с одной стороны.

К **организационно-техническим методам** компенсации следует отнести и такие мероприятия, как создание в помещениях, в которых изготавливают и эксплуатируют прецизионные приборы и оборудование, постоянной температуры, давления, влажности, а также отсутствие сквозняков, вибраций, пыли и т.п.

К конструктивным методам компенсации относится ввод в конструкцию специальных деталей и устройств для компенсации погрешностей, ухудшающих качество ОЭП, облегчающих сборку, юстировку и выверку прибора.

Конструктивные методы компенсации осуществляются, например, с помощью **ступенчатых компенсаторов, регулировочных устройств, механизмов силового замыкания и др.**

Ступенчатые компенсаторы - это детали, изменением размеров которых добиваются компенсации технологических и других погрешностей приборов. Изменение размеров компенсатора - скачкообразное (неплавное), достигается его заменой либо дополнительной технологической обработкой.

На **рис. 5** приведены примеры использования простейших конструктивных компенсаторов.

На **рис. 5 а** представлен компенсатор **к** (кольцо), заменой либо подрезкой которого добиваются фокусировки объектива.

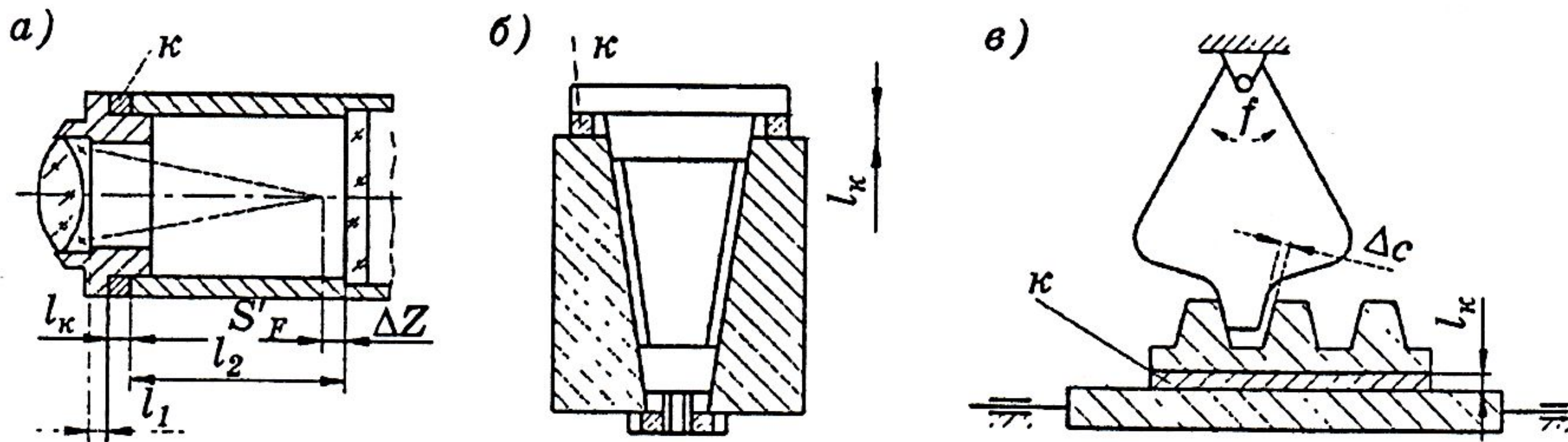
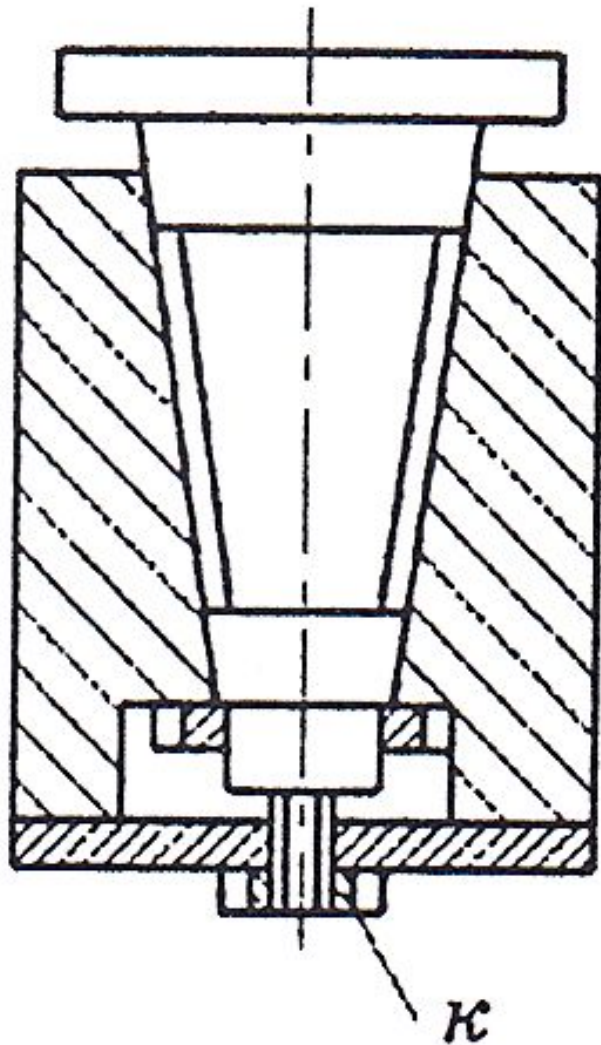


Рис. 5. Примеры использования простейших конструктивных компенсаторов

На **рис. 5 б** компенсационная прокладка позволяет регулировать зазор оси вращения.

На **рис. 5 в** прокладка позволяет регулировать боковой зазор в зацеплении.

При проектировании этих компенсаторов следует определить их размер и чувствительность, с которой их надо изменять (подбором или обработкой).



Регулировочные устройства в отличие от ступенчатых компенсаторов позволяют плавно изменять размеры и положения деталей и узлов, подвижкой которых обеспечивается требуемое качество.

На **рис. 6** изображено устройство для плавного регулирования зазора конической оси вращения в опоре.

Рис. 6. Регулировочное устройство

Силовое замыкание позволяет компенсировать погрешности изготовления и сборки, а также некоторые эксплуатационные факторы.

Пружинный подпятник (**рис. 7**), автоматически выбирает зазоры, предохраняет оси от поломки в условиях тряски и вибрации, компенсирует температурные колебания размеров.

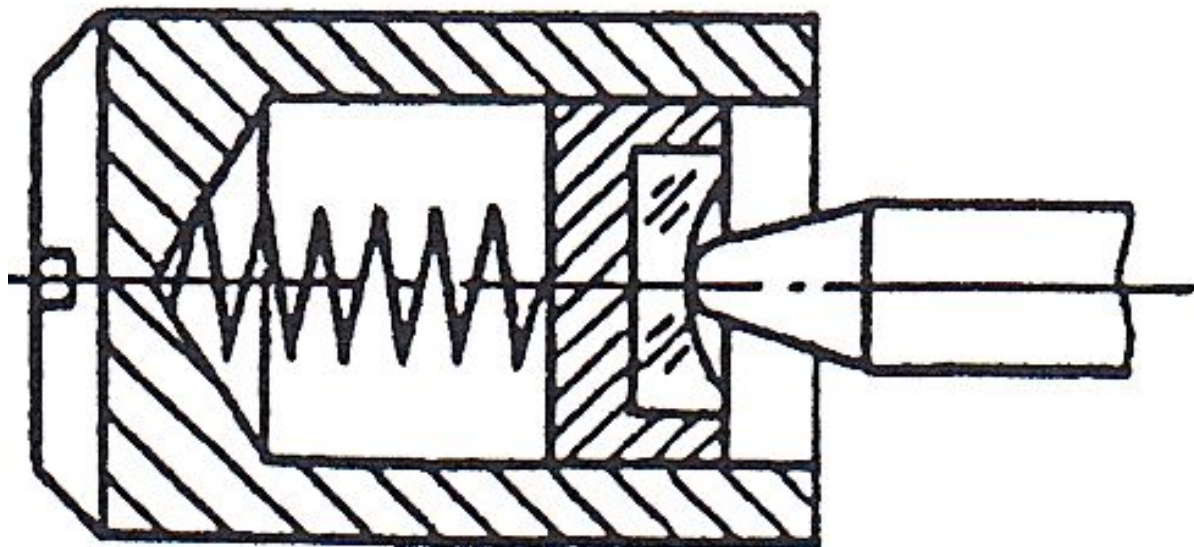


Рис. 7. Компенсатор погрешности на основе силового замыкания

В зависимости от вида компенсируемых погрешностей и места регулировки (изменения параметров) компенсаторы можно подразделить на **регулирующе-юстировочные, функциональные, настроечно-выверочные.**

Регулирующе-юстировочные компенсаторы предназначены для компенсации погрешностей отдельных деталей и размерных цепей. Их параметры изменяются при выполнении регулировок и юстировок прибора.

Типичными представителями компенсаторов этого типа являются, например, кольца для фокусировки объективов.

Функциональные компенсаторы, предназначены для компенсации переменных погрешностей функциональных преобразователей прибора. Их параметры изменяются при эксплуатации ОЭП.

Примерами такого типа компенсаторов могут служить коррекционные устройства, температурные компенсаторы, устройства стабилизации линии визирования, оптические адаптивные компенсаторы, алгоритмическая компенсация с помощью микроЭВМ и т.п.

Настрочно-выверочные компенсаторы предназначены для компенсации погрешностей ориентации прибора, износа, расстройки. Параметры этих компенсаторов изменяются в процессе настройки и выверки прибора.

К компенсаторам данного типа относятся, например, устройства для выверки оптических дальномеров по высоте и дальности, устройства выверки теодолита в полевых условиях для устранения наклона вертикальной, горизонтальной осей вращения и коллимационной ошибки.

ЮСТИРОВКА ОЭП

Юстировка является одним из специфических методов компенсации погрешностей ОЭП приборов, включающим и технологические, и организационно-технические, и конструктивные приемы.

Необходимость юстировки обусловливается тем, что ошибки при проектировании приборов и погрешности их изготовления (отклонения характеристик материалов оптических деталей от их номинального значения, погрешности размеров, форм, свойств покупных элементов) обычно не позволяют получить непосредственно после сборки необходимых показателей качества (в первую очередь качества изображения и точности).

Требуется проведение дополнительных мероприятий по устранению или компенсации тех или иных погрешностей путем подвижек деталей и элементов, их деформаций, дополнительной обработки, воздействия на свойства или результат функционирования и т. д. для обеспечения заданных характеристик прибора или узла.

Поэтому при конструировании оптико-электронных приборов следует предусматривать возможность выполнения их **юстировки**.

Юстировка - процесс, выполняемый во время или после сборки приборов и узлов, для достижения в них необходимых технических характеристик (показателей качества) путем устранения или компенсации погрешностей физически воздействуя на структурные элементы конструкции.

На практике и в отечественной литературе:

- термин **«юстировка»** обычно применяют к оптическим приборам и узлам;
- термин **«регулировка»** применяют к механизмам и электромеханическим устройствам;
- термин **«настройка»** применяют к электронным приборам и устройствам.

В немецкоязычной литературе термин **«юстировка»** применяется ко всем видам приборов, устройств и прецизионных машин.

При эксплуатации приборов иногда также возникает необходимость их юстировки из-за недопустимого ухудшения их качества в результате необратимого действия эксплуатационных погрешностей и факторов (износ и старение элементов, изменение их положений и характеристик из-за влияния сил, вибраций, ударов, перепада температуры и т.п.).

Естественно, что юстировкой устраняются или компенсируются влияния инструментальных (а не методических) погрешностей, причем тех, которые являются для конкретного прибора или устройства систематическими, а не случайными.

В процессе эксплуатации приборов применяются также операции их **выверки, настройки, калибровки** - представляющие собой мероприятия по ориентации прибора в пространстве, обеспечению необходимых режимов работы, введению поправок в цену деления и т.д., которые следует отличать от понятия **«юстировка»**.

Процесс юстировки в общем случае заключается в следующем:

- 1) выявление погрешностей прибора или его устройств, превосходящих допустимые значения;
- 2) выработка коррекционного юстировочного сигнала на исполнительное юстировочное устройство, осуществляющее коррекцию;

3) воздействие (механическое, электрическое, тепловое) юстировочным устройством на определенные структурные элементы прибора (функциональные устройства, узлы, детали) или специально вводимые в конструкцию компенсаторы с целью устранения недопустимых отклонений характеристик устройства от требуемых значений (исполнение коррекции);

4) фиксация юстируемых структурных элементов для надежного закрепления их положения, состояния, свойств, измененных в результате юстировки;

5) измерение требуемых технических характеристик прибора или узла (контроль результатов юстировки).

Обобщенная схема процесса юстировки представлена на **рис. 8.**

В общем случае исполнительное устройство **4** воздействует на структурные элементы так, что устраняются, уменьшаются либо сами погрешности, либо результат действия погрешностей на тот или иной показатель качества прибора.

Для выработки этого воздействия Δq_k необходим управляющий коррекционный сигнал Δz_k на исполнительное устройство, который вырабатывается системой сравнения **3.**

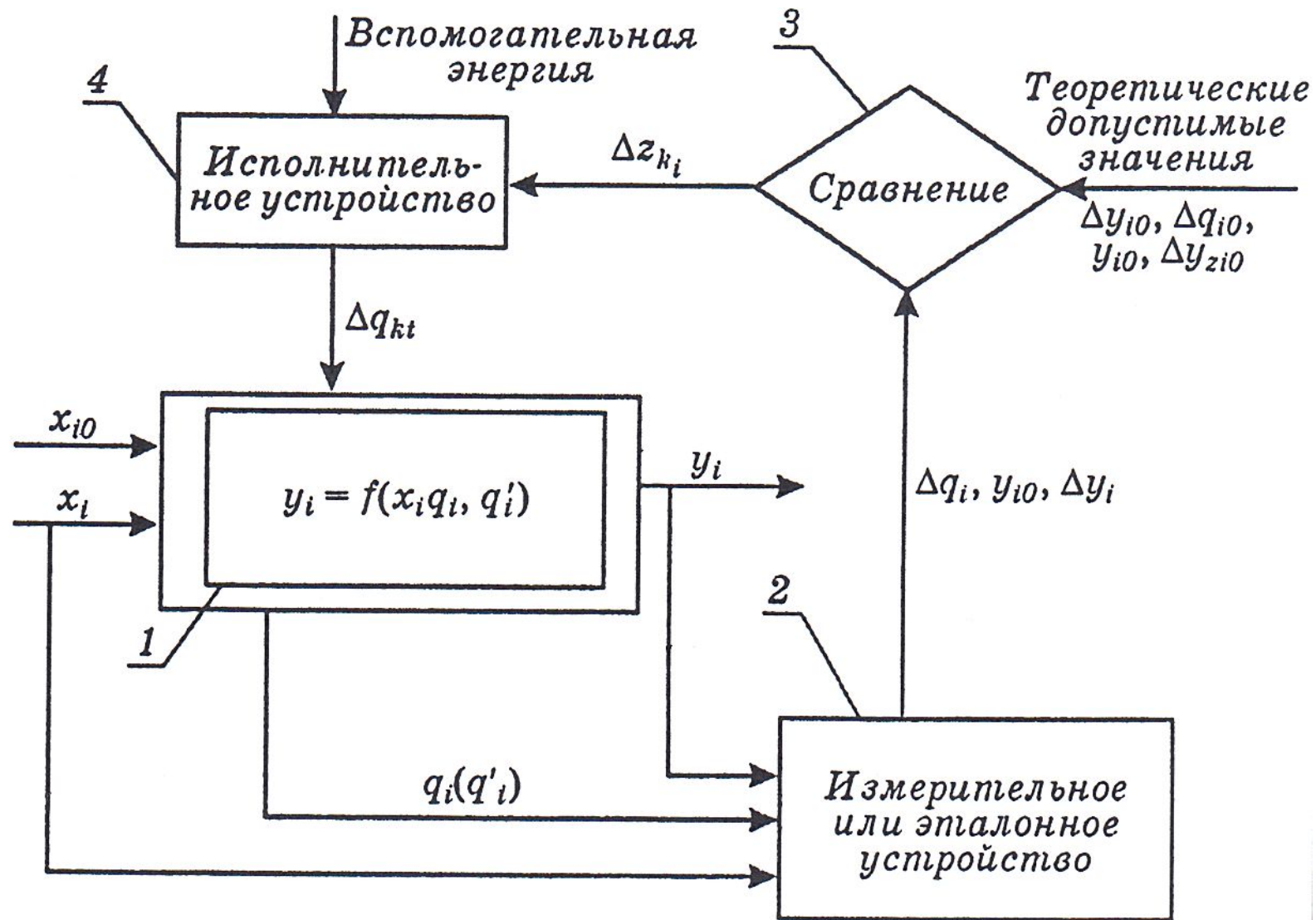


Рис. 8. Обобщенная схема процесса юстировки

В систему сравнения поступают номинальные значения параметров или значения погрешностей, полученные с помощью измерительных или эталонных устройств **2**, а также их номинальные или допустимые значения, известные из теории и технических условий (ТУ) на объект юстировки **1**.

Если действительные значения погрешностей или показателей качества больше их допустимых значений, то вырабатывается коррекционный сигнал.

В зависимости от способа получения управляющего сигнала структурные схемы юстировки могут быть построены по **схеме вспомогательных измерений** и **схеме образцовых сигналов**.

Юстировка по схеме вспомогательных измерений (рис.9) заключается в том, что погрешности конструктивных параметров (первичные погрешности), частичные погрешности выходных информативных параметров $(\Delta q_i, \Delta y_i)$ измеряются с помощью вспомогательных измерительных устройств (3). Их роль выполняют обычно контрольно-измерительные приборы и устройства.

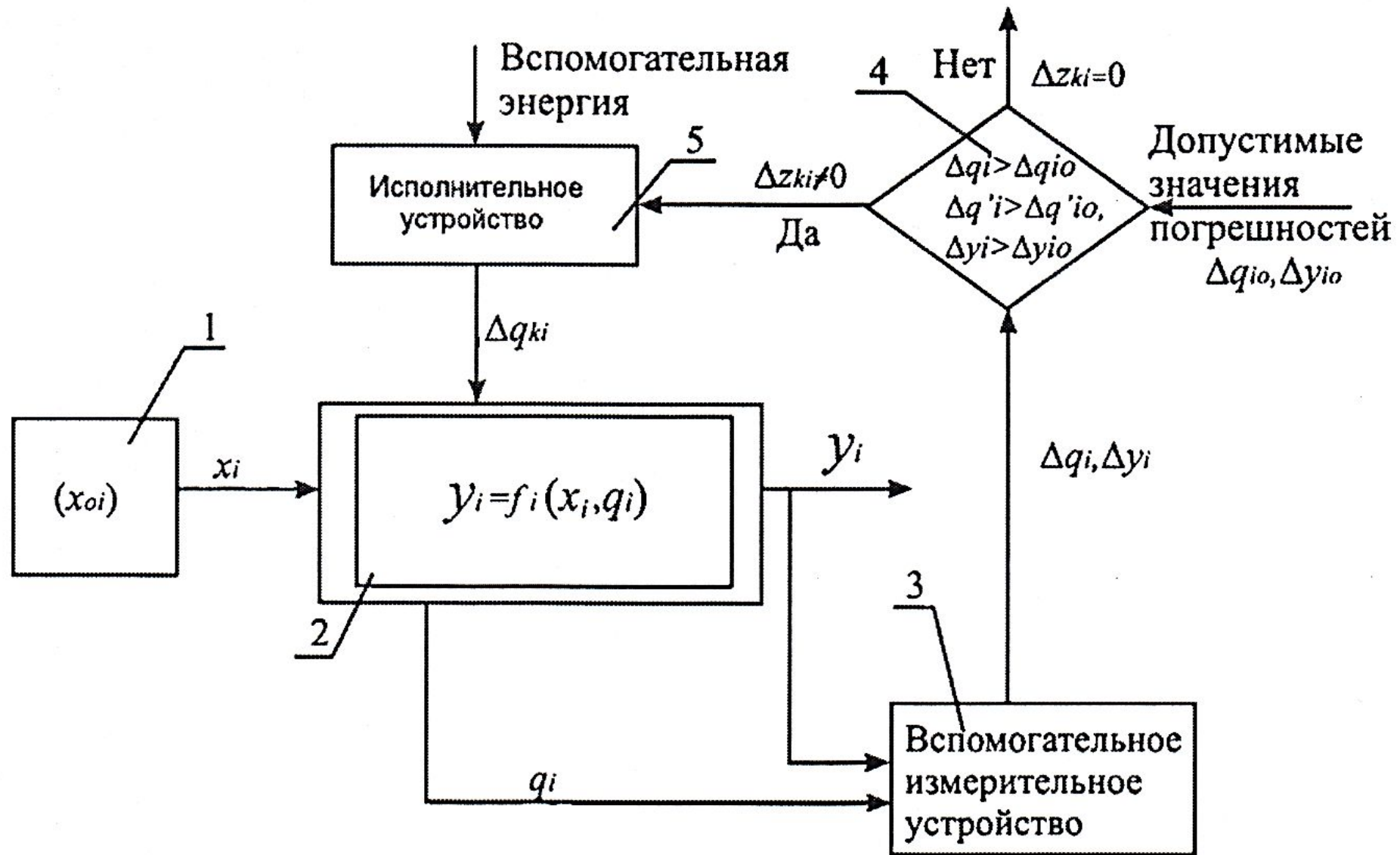


Рис. 9. Юстировка по схеме вспомогательных измерений

1 - объект (наблюдения, измерения, управления); **2** - ОЭП;
3 - измерительное устройство; **4** - система сравнения погрешностей с их допустимыми значениями; x, y - информативные параметры входного и выходного сигналов; q - конструктивные параметры прибора; f - функция, связывающая x и y ; y_0, q_0 - расчетные (номинальные) значения перечисленных параметров; Δz_{ki} - управляющий сигнал на исполнительное устройство; Δq_{ki} - коррекция исполнительного устройства, изменяющая параметры прибора.

Измеренные значения поступают затем в систему (устройство) сравнения (4), функцию которого выполняет, например, при автоматизированной юстировке процессор, а при неавтоматизированной - оператор.

В системе сравнения заложена зависимость погрешностей выходных информативных параметров (частичных показателей качества) от первичных погрешностей и факторов ($\Delta y_{\Delta q_i} = f_i(x, y, q_i, \Delta q_i)$), а также допустимые значения первичных погрешностей (Δq_{i0}) и их частичных влияний (Δy_{i0}) в виде численных значений, таблиц, графиков.

На основании сравнения измеренных первичных погрешностей с их допустимыми значениями система сравнения вырабатывает при условиях $\Delta q_i > \Delta q_{i0}$, $\Delta y_i > \Delta y_{i0}$ управляющий сигнал Δz_k на исполнительное устройство.

Исполнительное (юстировочное) устройство (инструмент, приспособление, привод) при необходимости с привлечением вспомогательной энергии воздействует на параметры или свойства структурных элементов либо компенсаторов в целях устранения самой погрешности или ее влияния на качество.

По этой схеме происходит юстировка элементов прибора при узловых сборке и отдельных показателей его качества (регулировка фокусных расстояний объективов, их фокусировка, устранение наклона или биения изображения в зеркально-призмных системах, доводка направляющих поступательного и вращательного движения и т.д.).

Типичным примером является юстировка формы отражающей поверхности адаптивного зеркала по измеренным значениям погрешностей расположения составляющих элементарных зеркал (**рис. 10**).

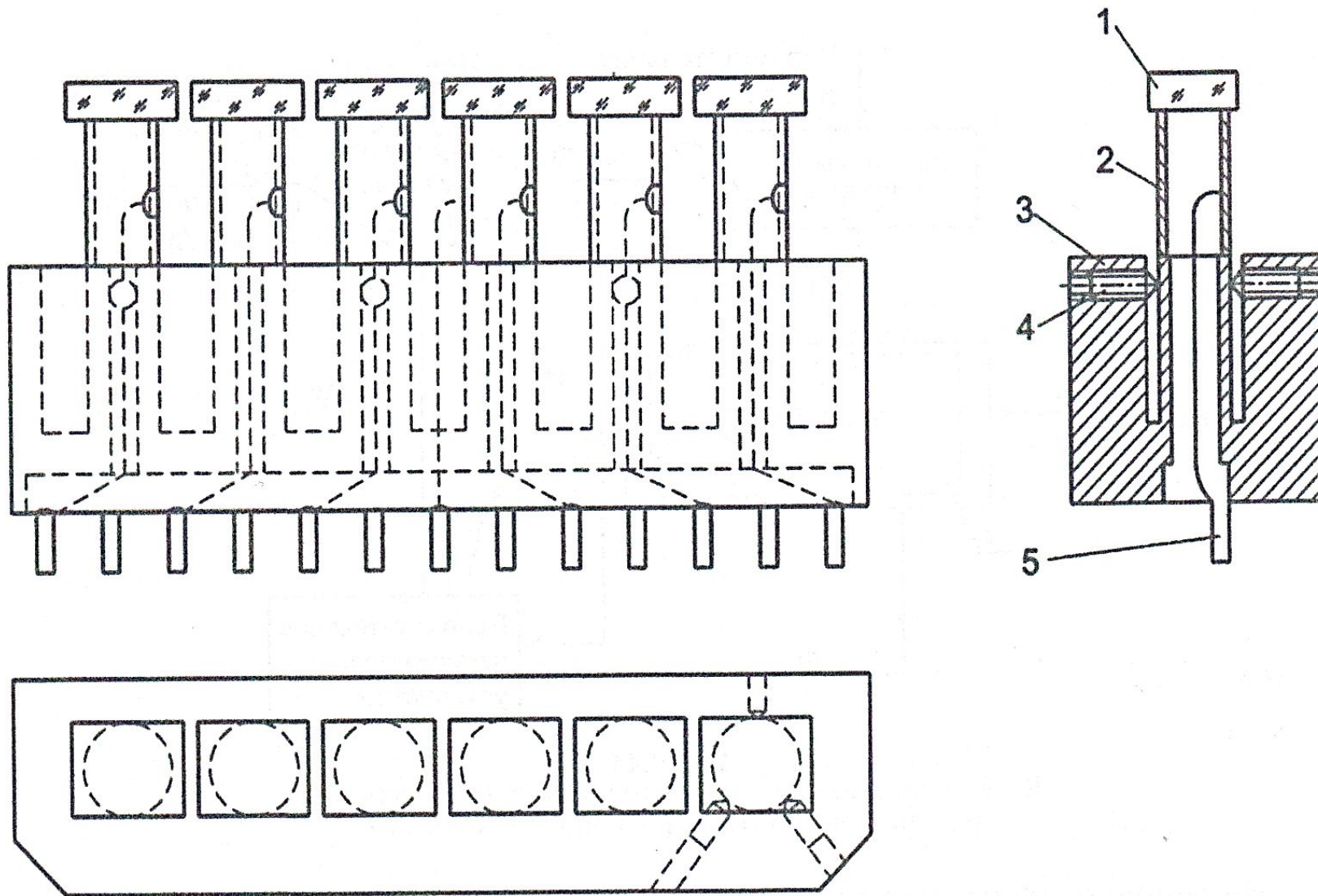


Рис. 10. Адаптивное зеркало: 1 - отдельное элементарное зеркало; 2 - цилиндр из пьезокерамики; 3 - основание; 4 - юстировочный винт; 5 - электрод

Коллинеарность и компланарность элементарных зеркал обеспечиваются их совместной полировкой после приклеивания (с последующим нанесением зеркального покрытия) и контроля с помощью пробного стекла или интерферометра либо параллельность - с помощью юстировочных винтов **4** и контролем по автоколлиматору, а расположение в одной плоскости - подачей посредством электрода **5** напряжения смещения на пьезокерамику, изменяющего размер (высоту) цилиндра с контролем по пробному стеклу или интерферометру.

Способ юстировки по схеме **вспомогательных измерений** обладает следующими особенностями:

- 1)** юстируется не суммарный показатель качества прибора, а только его составляющие, обусловленные отличием некоторых первичных, частичных или комплексных погрешностей от их номинального значения;
- 2)** для измерения отклонения каждой погрешности от ее номинального значения необходимо иметь соответствующее вспомогательное измерительное устройство (**ВИУ**);

- 3) система сравнения должна содержать для компенсируемых погрешностей их допустимые значения;
- 4) результат юстировки в существенной степени зависит от качества вспомогательного измерительного устройства и оптимальной последовательности операций.

Юстировка по схеме образцовых сигналов (рис. 11)

основана на том, что на вход прибора (функционального устройства) подается образцовый сигнал x_0 , либо входной сигнал подается также на образцовый прибор.

Образцовый сигнал позволяет получить теоретическое (номинальное) значение y_{i0} информативного сигнала путем расчета по номинальной функции прибора, а образцовый прибор или устройство - номинальным преобразованием сигнала.

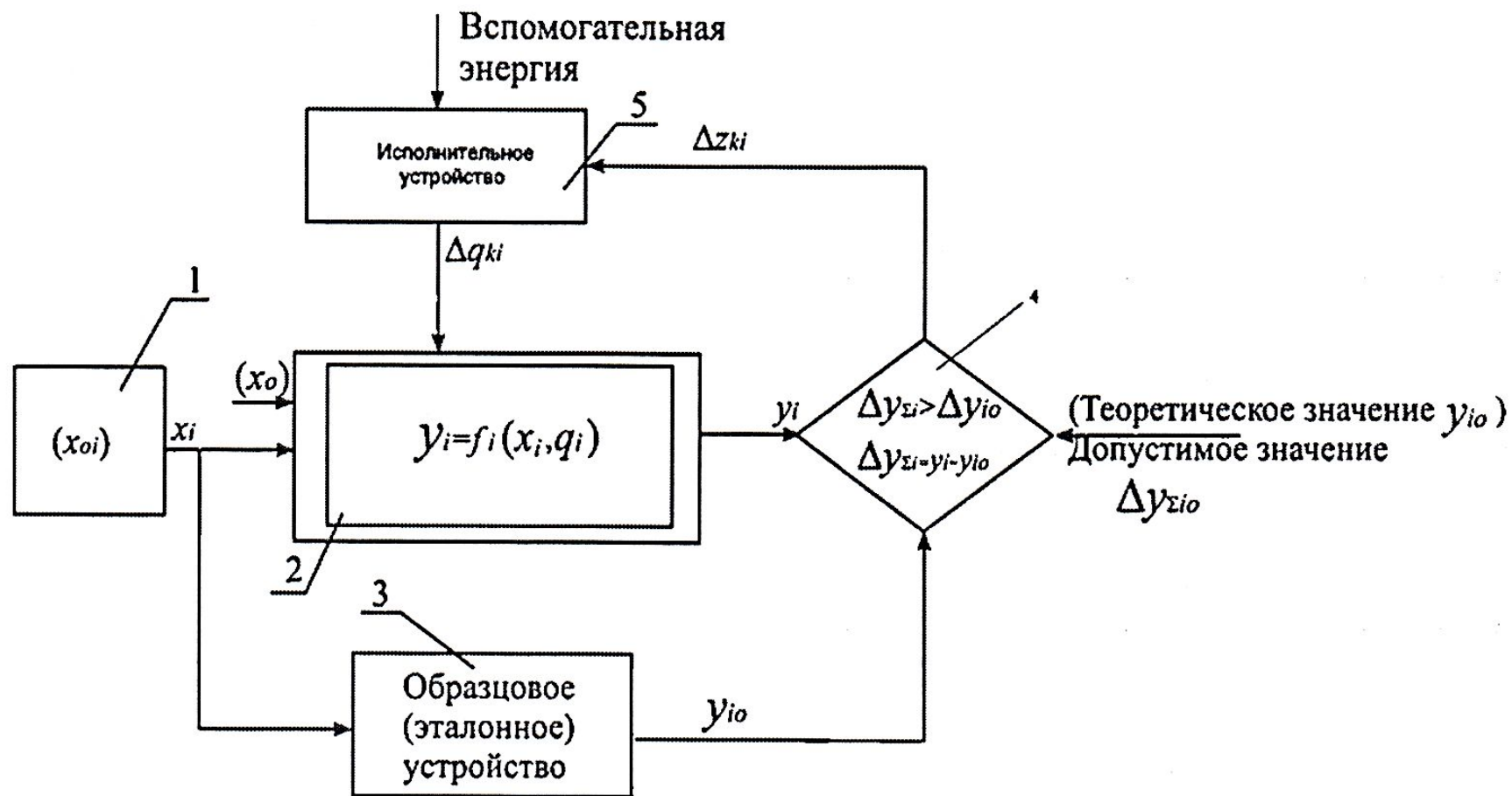


Рис. 11. Юстировка по схеме образцовых сигналов (обозначения как на рис. 9)

Номинальное значение поступает в систему сравнения (4), где вычисляется разность значения y_{i0} и действительного его значения y_i , поступившего с выхода прибора:

$$\Delta y_{\Sigma i} = y_i - y_{i0}$$

Система сравнения на основании сравнения $\Delta y_{\Sigma i}$, с его допустимым значением $\Delta y_{\Sigma i0}$ вырабатывает при $\Delta y_{\Sigma i} > \Delta y_{\Sigma i0}$ управляющий сигнал Δz_{ki} на исполнительное устройство (5).

В качестве образцового сигнала используются, например, волновой фронт эталонного источника светового излучения, эталоны угловых и линейных величин (шкалы, призмы, коллиматоры), углы и расстояния между предметами, звездами, длина волн спектральных линий и т.п.

Образцовыми преобразователями могут быть образцовые (эталонные) приборы, датчики, объективы и т.д.

По этой схеме обычно производится окончательная юстировка прибора или его функциональных устройств.

Юстировка по **схеме образцовых сигналов** обладает следующими особенностями:

- 1) юстируется показатель качества (суммарная погрешность) прибора или устройства, обусловленный влиянием всех действующих на него погрешностей;
- 2) необходим образцовый сигнал x_0 , либо образцовый прибор (устройство), позволяющие получить номинальное значение выходного сигнала y_{i0} ;

3) юстировка производится в дискретных точках диапазона работы прибора, соответствующих значениям образцового сигнала (например, для определенной длины волны света, конкретного значения угла, дистанции и т.д.), либо в моментах сравнения показаний юстируемого и эталонного приборов (устройств);

4) результат юстировки в существенной степени зависит от качества образцового сигнала или эталонного прибора.

Юстировочные расчеты

Юстировка является весьма трудоемким процессом. Она требует использования специальной оснастки, инструмента, прецизионных средств контроля.

Поэтому к ней следует прибегать только в случае, когда она действительно необходима для достижения требуемых показателей качества либо когда доказана ее экономическая эффективность благодаря расширению допусков на погрешности изготовления деталей, что обычно бывает при единичном и мелкосерийном производствах.

Юстировка прибора и его узлов должна предусматриваться на этапе их проектирования.

Поэтому на соответствующем этапе проектирования выполняют расчеты, доказывающие необходимость выполнения юстировки для получения того или иного показателя качества, определяют требования к результатам юстировки (точность юстировки), а также определяют диапазон и чувствительность воздействия на структурные элементы конструкции (диапазон и чувствительность регулировки), которые определяют требования к исполнительному устройству.

От правильного определения необходимого числа юстируемых параметров, требований к точности юстировки, диапазону и чувствительности регулировок, рациональной методики выполнения зависит эффективность юстировки прибора.

Число юстируемых параметров, требования к диапазону и чувствительности их регулировки, методика выполнения юстировки зависят от количества, вида и степени влияния первичных погрешностей, а также от заданных значений показателей качества на проектируемый прибор.

Поэтому юстировочные расчеты представляют собой сложную, многофакторную задачу, решение которой должно основываться на моделях, учитывающих взаимосвязь этих факторов.

При этом учитывают значение и характер влияния погрешности (случайное, неслучайное, аддитивное, мультипликативное и т.п.), условия производства (серийность, наличие необходимого оборудования и т.п.) и особенности эксплуатации прибора. Эти факторы позволяют выбрать метод компенсации и определить требования к его точности, диапазону и чувствительности регулировок.

Естественно, что вначале выбирают способ устранения или компенсации наиболее сильно влияющей погрешности, а также такой, который позволяет компенсировать не одну, а несколько погрешностей сразу.

Весьма часто не требуется проводить тщательных расчетов для доказательства необходимой юстировки того или иного частного показателя качества, так как априори известно, что его невозможно достичь. В этом случае определяют требования к чувствительности и диапазону юстировки, разрабатывают оптимальную методику ее выполнения.

Методы юстировки типовых приборов и функциональных устройств обычно изучаются в специальных курсах учебных дисциплин и изложены в ряде учебных пособий и публикаций.

Следует заметить, что методики юстировки современных приборов и функциональных устройств обычно держатся фирмами-производителями этой техники в секрете.

Вопросы к экзаменам

1. Методические и инструментальные погрешности.
2. Методические, инструментальные, динамические и флуктуационные погрешности.
3. Точностные расчеты оптико-электронных приборов.
4. Методы компенсации погрешностей в оптико-электронных приборах.
5. Юстировка. Структурные схемы юстировки.