

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра метрологии, приборостроения и управления качеством

ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 27.03.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 006.9:631.171 (073)

ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. Методы расчета и определения статических характеристик измерительных приборов: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *И.И. Сытько*. СПб, 2021. 33 с.

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Основы приборостроения» разработаны в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования и предназначено для студентов направления подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология».

Рассмотрен комплекс практических заданий в области методов расчета, определения и метрологического анализа статических характеристик измерительных приборов, оценки точности (погрешности, неопределенности) измерительных приборов на этапе проектирования и производства.

Научный редактор проф. *И.Е. Ушаков*

Рецензент к.т.н. *А.Е. Ивкин* (ООО «Константа»)

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Основы приборостроения» разработаны в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования и предназначены для студентов бакалавриата направления 27.03.01 – «Стандартизация и метрология» и изучаются в 7 семестре.

Цель изучения дисциплины – приобретение студентами базовых знаний в области проектирования измерительных приборов, знаний, умений и владений, связанных с проведением метрологического анализа измерительных приборов на уровне структурных и функциональных схем; ознакомление с методологией проектирования измерительных приборов

Основными задачами дисциплины являются:

- изучение основных принципов построения измерительных приборов;
- овладение методами расчета статических и динамических погрешностей измерительных приборов;
- ознакомление с перспективами развития измерительных приборов;
- приобретение навыков оценки точности (погрешности, неопределенности) измерительных приборов на этапе проектирования и производства;
- приобретение навыков практического применения компьютерной техники и программного обеспечения при метрологическом анализе измерительных приборов на этапах проектирования и производства;
- формирование мотивации к самостоятельному повышению уровня профессиональных навыков в области проектирования измерительных приборов.

Методические указания состоит из 5 практических занятий (1 – 5), которые включают введение, практические задания и указания к их выполнению. В соответствии с учебным планом и расписанием занятий в 7 семестре предусмотрено 36 часов практических занятий. Из них 1, 6, 9 – 12 практические занятия 4-х часовые, а 2 –

5, 7 – 8 2-х часовые. После выполнения практической части студенты защищают свою работу, отвечая преподавателю на вопросы по теме занятия.

Практикум ведется в конспекте лекций студента или отдельной ученической тетради и оформляется следующим образом:

1. Указать номер и название практического занятия.

2. Указать цель занятия, названия заданий, условия (в виде текста или таблиц). Заполнить данными представленными в задании формы; привести все необходимые расчеты, графики; ответить письменно на вопросы.

3. Работа должна заканчиваться результатами расчета и выводом, который можно сформулировать, ориентируясь на цель занятия.

После выполнения практической части заданий студенты защищают свою работу, отвечая преподавателю на вопросы по теме занятия.

Целью практических занятий является закрепление и практическое использование знаний, полученных при изучении теоретического курса дисциплины «Основы приборостроения». Умение решать задачи, связанные с расчетом статических и динамических метрологических характеристик измерительных преобразователей и приборов, владением методами расчета статических и динамических погрешностей средств измерений, а также методами оптимизации структуры и синтеза средств измерений, методами повышения точности.

Для самоконтроля знаний при подготовке к практическим занятиям после каждого практического занятия приведены контрольные вопросы, на которые студентам необходимо ответить.

Практические занятия

Практическое занятие № 1. Расчет статической функции преобразования аналогового измерительного преобразователя

Цель занятия – умение выводить аналитическую и строить статическую функцию преобразования аналогового измерительного преобразователя. Определять относительную погрешность коэффициента преобразования при заданном допуске на элементы измерительного преобразователя.

Основные теоретические положения

Статические характеристики средств измерений. Различают заданную, расчетную и номинальную статические характеристики.

Заданная характеристика – это зависимость Y от X , требуемая по техническому заданию

$$Y_{зад} = f_{зад}(X) \quad (1.1)$$

Расчетная характеристика получается в результате расчета конкретной схемы и конструкции средства измерений

$$Y = f(X, q_1, \dots, q_i, \dots, q_n) \quad (1.2)$$

где $q_1, \dots, q_i, \dots, q_n$ – параметры схемы и конструкции, в число которых входят как геометрические параметры (размеры деталей), так и физические параметры (модуль упругости, электропроводность, магнитная проницаемость и т. п.).

Параметры $q_1, \dots, q_i, \dots, q_n$ в различных образцах однотипных средств измерений отличаются от номинальных значений вследствие влияния технологических факторов в процессе изготовления средств измерений, а также могут изменяться в процессе эксплуатации из-за изменения режимов питания и окружающих условий (температуры, атмосферного давления, влажности и др.). Поэтому в уравнении величина Y является функцией многих переменных, что учитывается при анализе погрешностей. Если в уравнении все параметры приравнять их номинальным расчетным значениям и считать

постоянными ($q_1=q_{10}, \dots, q_i=q_{i0}, \dots, q_n=q_{n0}$), то это уравнение будет выражать номинальную расчетную характеристику

$$Y_{ном} = f(X, q_{10}, \dots, q_{i0}, \dots, q_{n0}) \quad (1.3)$$

Если при этом учесть, что $q_{10}, \dots, q_{i0}, \dots, q_{n0}$ – постоянные, то номинальную расчетную характеристику можно записать как функцию одного переменного

$$Y_{ном} = f(X) \quad (1.4)$$

Допустим, для измерительного преобразователя известна математическая модель вида

$$K = f(q_1, \dots, q_i, \dots, q_n) \quad (1.5)$$

где K – выходной параметр измерительного преобразователя (например, коэффициент преобразования);

$q_1, \dots, q_i, \dots, q_n$ – первичные параметры – параметры схемы и конструкции;

n – количество учитываемых первичных параметров.

Будем считать, что абсолютные производственные отклонения первичных параметров значительно меньше, чем сами параметры. Тогда можно записать

$$K + \Delta K = f(q_{10} + \Delta q_1, \dots, q_{i0} + \Delta q_i, \dots, q_{n0} + \Delta q_n) \quad (1.6)$$

Разложим данное уравнение в ряд Тейлора в точке

$$Q_0 = \{q_{10}, \dots, q_{i0}, \dots, q_{n0}\}$$

где q_{i0} – среднее значение i -го первичного параметра.

Отбросив члены 2-го и высшего порядков малости, а затем вычтя из полученного уравнения, уравнение (1.5), получим

$$\Delta K \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{dK}{dq_i} \right) \Delta q_i \quad (1.7)$$

Это выражение называется уравнением абсолютной производственной погрешности выходного параметра измерительного преобразователя. В приведенном уравнении Δq_i есть абсолютные производственные погрешности первичных параметров, $i=1, \dots, n$.

Величины $\partial K/\partial q_i$ называют абсолютными коэффициентами чувствительности. Они показывают как реагирует величина ΔK на значение отклонения Δq_i .

Если разделить уравнение (1.7) на выражение (1.5), получим уравнение относительной производственной погрешности выходного параметра измерительного преобразователя

$$\delta_k = \sum_{i=1}^n \frac{dK}{dq_i} \frac{\Delta q_i}{K}$$

При выполнении этой операции с целью выявления величины $\Delta q_i/q_i$ произведено умножение и деление на q_i . Тогда получим выражение

$$\delta_k = \sum_{i=1}^n \frac{dK}{dq_i} \frac{q_i}{K} \frac{\Delta q_i}{q_i} = \sum_{i=1}^n B_{qi} \frac{\Delta q_i}{q_i} \quad (1.8)$$

Отношение

$$B_{qi} = \frac{dK}{dq_i} \frac{q_i}{K}$$

называют относительным коэффициентом чувствительности или коэффициентом влияния. Он характеризует степень влияния относительной погрешности первичного параметра на относительную погрешность выходного параметра измерительного преобразователя. Нижний индекс «ноль» указывает, что после дифференцирования и до умножения на q_i/K в полученное уравнение необходимо подставить средние значения $q_1, \dots, q_i, \dots, q_n$, если в выражении они еще останутся.

Задание 1.

Вывести выражение и построить номинальную статическую метрологическую характеристику (функцию преобразования) линейного (масштабирующего) аналогового измерительного преобразователя электронного вольтметра постоянного тока. В качестве из-

мерительного преобразователя используется резистивный делитель напряжения (рис.1.1). Определить относительную погрешность коэффициента преобразования при заданном допуске резисторов делителя.

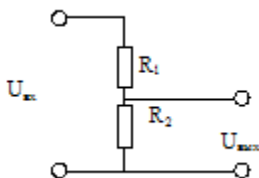


Рис.1.1. Структурная схема масштабирующего измерительного преобразователя

Исходные данные для расчетов приведены в табл.1.1, которые студент выбирает по последней и предпоследней цифре собственного шифра.

Таблица 1.1

	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1, \text{кОм}$	10	20	30	40	50	5	15	25	35	45
$R_2, \text{кОм}$	20	30	50	60	80	10	30	40	70	80
	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\pm\delta_{R1}, \%$	2	1			0,5		1,5		2	
$\pm\delta_{R2}, \%$	1	0,5			1,5		2		1,5	2
$U_{\text{вх}}, \text{В}$	от -10 до +10					от -20 до +20				

Указания.

Функция преобразования резистивного делителя напряжения (масштабирующего преобразователя) имеет вид

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{вх}} = K \cdot U_{\text{вх}}, \quad (1.9)$$

где K – коэффициент преобразования;

R_1 и R_2 – сопротивление резисторов плеч делителя напряжения;

$U_{\text{вх}}$ – напряжение на входе преобразователя.

Относительную погрешность (допуск) коэффициента преобразования определим, используя метод «min-max». Суть метода со-

стоит в следующем. Вначале определяется максимальное отклонение коэффициента преобразования, которое он может принять в левой (отрицательной) стороне относительно номинального значения. Затем определяют максимальное отклонение коэффициента преобразования в правой (положительной) стороне.

При подсчете указанных отклонений пользуются непосредственно уравнением относительной производственной погрешности коэффициента преобразования, подставляя в него предельные (наихудшие) значения относительных отклонений резисторов R_1 и R_2 . Для этого необходимо найти значения коэффициентов влияния резисторов R_1 и R_2 .

Значения коэффициентов влияния резисторов R_1 и R_2 определяются по формулам

$$B_{R1} = \left[\frac{dK}{dR_1} \cdot \frac{R_1}{K} \right] = - \frac{R_{10}}{R_{10} + R_{20}} , \quad (1.10)$$

$$B_{R2} = \left[\frac{dK}{dR_2} \cdot \frac{R_2}{K} \right] = \frac{R_{10}}{R_{10} + R_{20}} ,$$

где R_{10} и R_{20} – номинальные значения резисторов.

Для определения относительной производственной погрешности коэффициента преобразования необходимо использовать выражение

$$\delta_k = \frac{\Delta K}{K} = \sum_{i=1}^2 B_{Ri} \frac{\Delta R_i}{R_i} = \sum_{i=1}^2 B_{Ri} \delta_{Ri} \quad (1.11)$$

С учетом предельных отклонений относительных производственных погрешностей сопротивлений резисторов δ_{R1} и δ_{R2} , находим максимальное значение относительной погрешности коэффициента преобразования в левой стороне «в минимуме» (при $+\delta_{R1}$ и $-\delta_{R2}$), а затем в правой стороне «в максимуме» (при $-\delta_{R1}$ и $+\delta_{R2}$) по формулам

$$\delta_{k(\min)} = B_{R1} \cdot (+\delta_{R1}) + B_{R2} \cdot (-\delta_{R2}) \quad (1.12)$$

$$\delta_{k(\max)} = B_{R1} \cdot (-\delta_{R1}) + B_{R2} \cdot (+\delta_{R2})$$

Производственный допуск на коэффициент преобразования в окончательном виде может быть установлен, как

$$\delta_k = [(\delta_k)_{\min} \dots (\delta_k)_{\max}] \quad (1.13)$$

Тогда, функция преобразования резистивного делителя напряжения (масштабирующего преобразователя) в «в минимуме» равна

$$U_{\text{вых}(\min)} = (K + \Delta K_{\min}) \cdot U_{\text{вх}}, \quad (1.14)$$

где
$$\Delta K_{\min} = \frac{K \cdot \delta_{k(\min)}}{100 \%}$$

Аналогично определяем функцию преобразования резистивного делителя напряжения (масштабирующего преобразователя) в «в максимуме», которая будет равна

$$U_{\text{вых}(\max)} = (K + \Delta K_{\max}) \cdot U_{\text{вх}}, \quad (1.15)$$

где
$$\Delta K_{\max} = \frac{K \cdot \delta_{k(\max)}}{100 \%}$$

Предельные отклонения относительных производственных погрешностей сопротивлений резисторов δ_{R1} и δ_{R2} при заданном производственном допуске на коэффициент преобразования δ_k ($\delta_{k(\min)}$, $\delta_{k(\max)}$) определяют путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \delta_{k(\min)} = B_{R1} \cdot (+\delta_{R1}) + B_{R2} \cdot (-\delta_{R2}) \\ \delta_{k(\max)} = B_{R1} \cdot (-\delta_{R1}) + B_{R2} \cdot (+\delta_{R2}) \end{cases} \quad (1.16)$$

и учитывая, что производственные погрешности сопротивлений резисторов R_1 и R_2 являются симметричными и по абсолютному значению равны, тогда

$$\delta_{R1} = \pm \left| \frac{\delta_{k(\min)} - \delta_{k(\max)}}{4 \cdot B_{R1}} \right|, \quad (1.17)$$

а

$$\delta_{R2} = \pm \left| \frac{\delta_{k(\max)} - \delta_{k(\min)}}{4 \cdot B_{R2}} \right|. \quad (1.18)$$

Построить статическую функцию преобразования (рис.1.2), когда коэффициент преобразования K равен

- номинальному значению;

- минимальному значению $K_{\min} = K \cdot \delta_{k(\min)}$;

- максимальному значению $K_{\max} = K \cdot \delta_{k(\max)}$.

По графику определить полосу погрешностей. Сделать вывод как влияют допуски резисторов на посылу погрешностей функции преобразования.

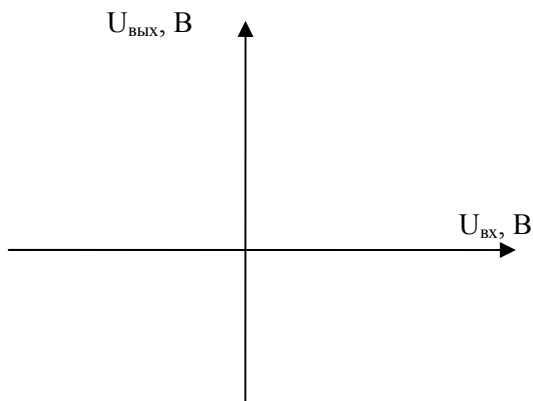


Рис.1. 2. Номинальная и расчетная статическая функция преобразователя аналогового измерительного преобразователя

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите примеры измерительных преобразователей.
2. Поясните отличие датчика от измерительного преобразователя измерительного прибора.
3. Поясните в чем отличие измерительных преобразователей от измерительных приборов.
4. Приведите примеры датчиков.
5. Перечислите структурные элементы средств измерений.
6. Перечислите требования, предъявляемые к измерительным приборам.

Практическое занятие № 2. Расчет чувствительности измерительных приборов прямого и уравнивающего преобразования

Цель занятия – умение рассчитывать чувствительность измерительного прибора по его структурной схеме.

Основные теоретические положения

Звенья измерительных приборов могут соединяться между собой одним из трех типовых способов: последовательно (рис. 2.1, а); параллельно (рис. 2.1, б); встречно-параллельно (рис. 2.1, в).

Для встречно-параллельного соединения (рис. 2.1, в) звено 2, расположенное во встречной цепи, называют обратным преобразователем. Выходной сигнал X_1 обратного преобразователя может суммироваться с входным сигналом X с тем же знаком (положительная обратная связь) или с обратным знаком (отрицательная обратная связь).

Схемы, в которых звенья соединены последовательно или параллельно, являются разомкнутыми; схема со встречно-параллельным соединением является замкнутой. Структурная схема прибора может содержать различные виды соединений звеньев и быть замкнутой не полностью, а на отдельных участках.

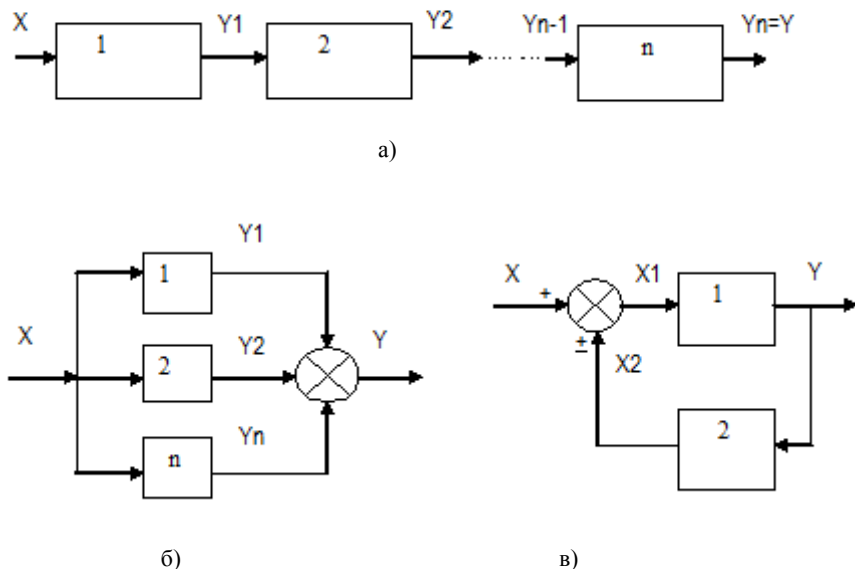


Рис. 2.1. Типовые соединения звеньев: а – последовательное, б – параллельное, в – встречно-параллельное, 1, 2, ..., n – звенья)

Для типовых соединений звеньев (рис. 2.1) можно вывести стандартные формулы, выражающие статическую характеристику и чувствительность прибора через статические характеристики и чувствительность его звеньев.

Последовательное соединение (рис. 2.1, а). Если характеристики звеньев 1, 2, ..., n выражены соответственно уравнениями

$$\begin{aligned} Y_1 &= f_1(X); \\ Y_2 &= f_2(Y_1); \\ &\dots\dots\dots \\ Y_{n-1} &= f_{n-1}(Y_{n-2}); \\ Y &= f_n(Y_{n-1}), \end{aligned} \tag{2.1}$$

то результирующая характеристика прибора определяется совместным решением системы уравнений

$$Y_n = f_n \{ f_{n-1} \dots f_2 [f(X_1)] \}$$

Чувствительность прибора

$$S = \frac{dY}{dX}.$$

Умножим и разделим правую часть данного равенства на

$$dY_1, dY_2, \dots, dY_{n-1},$$

тогда чувствительность прибора определится как

$$S = \left(\frac{dY_1}{dX} \right) \times \left(\frac{dY_2}{dY_1} \right) \dots \times \left(\frac{dY_n}{dY_{n-1}} \right)$$

Имея в виду, что

$$\left(\frac{dY_1}{dX} \right) = S_1, \left(\frac{dY_2}{dY_1} \right) = S_2, \dots, \left(\frac{dY_n}{dY_{n-1}} \right) = S_n,$$

получим окончательно

$$S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n = \prod_{i=1}^n S_i \quad (2.2)$$

Характеристику прибора можно определить и графическим путем. Для прибора с тремя последовательно соединенными звеньями в четвертях I, II, III прямоугольной системы координат строят соответственно характеристики звеньев 1, 2, 3, а затем с помощью построения определяют результирующую характеристику прибора в IV четверти.

Если прибор содержит более трех звеньев, то построение ведется в несколько этапов. В начале, находят характеристику соединения из первых трех звеньев, затем повторяют построение на другом графике, рассматривая первые три звена как одно звено.

Параллельное соединение (рис. 2.1, б). Если характеристики n параллельных звеньев имеют вид

$$\begin{aligned} Y_1 &= f_1(X); \\ Y_i &= f_i(X); \\ Y_n &= f_n(X), \end{aligned} \quad (2.3)$$

а уравнение связи

$$Y = Y_1 + \dots + Y_i + \dots + Y_n$$

то статическая характеристика системы получается подстановкой уравнений в уравнение связи

$$Y = f_1(X) + \dots + f_i(X) + \dots + f_n(X).$$

Для определения чувствительности дифференцируем уравнение по входной величине X

$$S = \frac{dY_1}{dX} + \dots + \frac{dY_i}{dX} + \dots + \frac{dY_n}{dX}$$

Имея в виду, что

$$S_1 = \frac{dY_1}{dX}, \quad S_i = \frac{dY_i}{dX}, \quad S_n = \frac{dY_n}{dX}$$

получим

$$S = S_1 + \dots + S_i + \dots + S_n = \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.4)$$

При графическом расчете характеристики всех параллельных звеньев строят в прямоугольной системе координат (в I-й четверти). Суммируя ординаты всех кривых при фиксированном значении X , находят координаты точек результирующей характеристики.

Встречно-параллельное соединение (рис. 2.1, в). Если характеристики двух встречно-параллельных звеньев имеют вид

$$Y = f_1(X_1);$$

$$X_2 = f_2(Y);$$

то, решая их совместно с уравнением связи

$$X_1 = X \pm X_2,$$

получим в неявном виде характеристику системы:

$$Y = f_1[X \pm f_2(Y)]$$

В полученном уравнении знак «плюс» отвечает положительной обратной связи, знак «минус» – отрицательной.

Чувствительность системы при встречно-параллельном соединении звеньев определяется как

$$S = \frac{S_1}{1 \pm S_1 \times S_2}. \quad (2.5)$$

Здесь знак «плюс» отвечает отрицательной обратной связи, знак «минус» – положительной.

При графическом расчете характеристики обоих звеньев строят в прямоугольной системе координат (в I-й четверти). Суммируя абсциссы этих кривых при фиксированном значении U , находят координаты точек результирующей характеристики.

Задание 1.

На рис.2.2 представлена структурная схема измерительного прибора уравнивающего преобразования. Вывести уравнение и рассчитать чувствительность измерительного прибора, если заданы чувствительности звеньев. Сделать вывод как влияют отдельные звенья прибора на его чувствительность. Для этого поочередно изменять чувствительность каждого звена в пределах $\pm 10\%$ относительно номинального значения и рассчитывать чувствительность прибора.

Исходные данные для выполнения задания студент выбирает из табл.2.1.

Таблица 2.1

Последняя цифра шифра									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количественные значения чувствительности звеньев S_i									
S_1									
3	4	6	9	7	5	8	3	4	2
S_2									
4	2	8	12	9	7	4	3	6	8
Предпоследняя цифра шифра									
0	1	2	3	4	5	6	3	4	2
S_3									
5		4		8		12		6	
S_4									
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
S_5									
1									

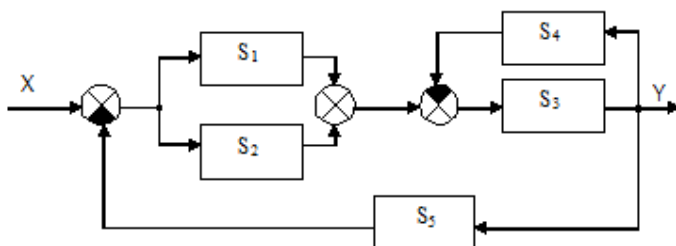


Рис.2.2. Структурная схема измерительного прибора уравнивающего преобразования

Задание 2.

На рис.2.3. представлена структурная схема измерительного прибора уравнивающего преобразования. Особенностью схемы состоит в том, что выходная величина $U_{\text{вых}}$, как показано на рис.2.3, подвергается обратному преобразованию в величину $U_{\text{ос}}$, однородную с входной величиной $U_{\text{вх}}$, и почти полностью уравнивает ее, в результате чего на вход цепи прямого преобразования поступает только небольшая часть ΔU преобразуемой входной величины $U_{\text{вх}}$.

Определить:

- уравнение измерительного преобразования $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{вх}})$;
- коэффициент преобразования (чувствительность) измерительного прибора $K_{\text{ул}}$;
- определить относительную погрешность прибора, обусловленную нестабильностями коэффициентов преобразования прямой цепи (K) и цепи обратной связи (β).

Провести анализ:

- влияние цепи прямого преобразования (K) и цепи обратной связи (β) на чувствительность прибора;
- влияние на относительную погрешность прибора величины коэффициента прямого преобразования (K) его нестабильность;
- влияние на относительную погрешность прибора величины коэффициента обратного преобразования (β) его нестабильность.

По структурной схеме и уравнению измерительного преобразования $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{вх}})$, пояснить благодаря какому элементу (цепи) нелинейность функции преобразования уменьшается.

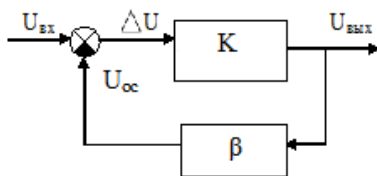


Рис.2.3. Структурная схема измерительного прибора уравнивающего преобразования

Исходные данные для выполнения задания студент выбирает из табл.2.2.

Построить:

- график влияния на относительную погрешность прибора, относительной нестабильности коэффициента преобразования прямой цепи (K), при постоянных коэффициентах преобразования прямой цепи (K), цепи обратной связи (β) и его относительной нестабильности;

- график влияния на относительную погрешность прибора, относительной нестабильности коэффициента преобразования цепи обратной связи (β), при постоянных коэффициентах цепи обратной связи (β), прямой цепи (K) и его относительной нестабильности.

Относительную нестабильность прямой цепи и относительную нестабильность цепи обратной связи варьировать от 0 до 25.

Таблица 2.2

	Последняя цифра шифра			
	0-2	3-5	6-7	8-9
K	20	25	15	30
ΔK	2	3	2,5	3
β	10	5	15	20
$\Delta \beta$	0,5	0,2	0,7	1,5

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите способы соединения типовых звеньев измерительных приборов.
2. Поясните порядок определения чувствительности прибора при последовательной соединении звеньев.
3. Поясните порядок определения чувствительности прибора при параллельном соединении звеньев.
4. Поясните порядок определения чувствительности прибора при встречно-параллельном соединении звеньев.
5. Поясните порядок определения характеристик (чувствительности) прибора графическим путем при последовательном, параллельном и встречно-параллельном соединении звеньев.

Практическое занятие № 3. Расчет статической характеристики маятникового акселерометра

Цель занятия – умение составлять структурные метрологические и структурные схемы приборов, выводить статические характеристики и рассчитывать погрешности приборов.

Основные теоретические положения

В зависимости от поставленной задачи и состава исходных данных применяют разные методы расчета погрешностей измерительных приборов.

Дифференциальный метод. Для применения дифференциального метода оценки погрешностей измерительных приборов, необходимо:

- иметь аналитическое выражение функции выходного сигнала, которая должна быть непрерывной и дифференцируемой;
- знать первичные погрешности входных параметров, диапазон их изменения.

В процессе разработки прибора важной задачей является оценка допустимых значений первичных погрешностей входных параметров по допустимой погрешности выходного параметра (обратная задача теории точности).

На практике эту задачу можно решить при определенных допущениях:

а) приравнивают влияние погрешностей каждого входного параметра и считают, что предельные значения первичных погрешностей входных параметров могут быть одинаковыми $\Delta x_1 = \Delta x_i = \Delta x_n$.

Тогда
$$\Delta x_i = \Delta y \left[\sum_{i=1}^n \frac{df}{dx_i} \right]^{-1}$$
.

Применение такого вида допущений связано с приведением входных параметров (значений погрешностей) к одной размерности.

б) предполагают, чтобы входные параметры имели одинаковые значения относительных погрешностей $\delta_1 = \delta_i = \delta_n = k$. Следовательно $\Delta x_i = x_i \cdot \delta_i = x_i \cdot k$.

Для погрешности выходного параметра

$$\Delta y = k \cdot \sum_{i=1}^n \left| x_i \frac{df}{dx_i} \right|,$$

или подставляя значение (к), получаем

$$\Delta x_i = \Delta y |x_i| \cdot \sum_{i=1}^n \left| x_i \frac{df}{dx_i} \right|^{-1}$$

Для абсолютной погрешности выходного параметра выражение имеет вид

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{df}{dx_i} \Delta x_i, \tag{3.1}$$

а относительной погрешности

$$\delta_y = \sum_{i=1}^n \frac{df}{dx_i} \cdot \frac{\Delta x_i}{x_i} \cdot \frac{x_i}{y_0} = \sum_{i=1}^n \delta_{x_i} B_i \tag{3.2}$$

где $B_i = \frac{df}{dx_i} \frac{x_i}{y_0}$ — коэффициент влияния относительной погрешности i -го первичного параметра

Задание 1.

На рис.3.1 представлена схема маятникового акселерометра. Составить структурную метрологическую и структурную (динамическая) схему маятникового акселерометра. Вывести статическую характеристику акселерометра двумя способами. Первый – по метрологической структурной схеме, второй – по структурной схеме. Рассчитать погрешность маятникового акселерометра. Сделать вывод как влияют погрешности звеньев на погрешность акселерометра.

Учитывать, что жесткость спиральной пружины определяется как

$$C_{np} = \frac{b \times h^3 \times E}{12 \times L},$$

где L – развернутая длина, b – ширина, h – толщина, E – модуль упругости материала спиральной пружины.

Характеристики звеньев:

$$\begin{aligned} F &= ma, \\ M_{вр} &= F \cdot l, \\ M_{np} &= C_{np} \cdot \phi, \\ U_{вых} &= U_o \cdot \phi / \phi_o, \end{aligned}$$

где m , l – масса и длина маятника;

U_o , ϕ_o – напряжение питания и полный рабочий угол потенциометра; a – измеряемое ускорение; $U_{вых}$, ϕ – выходное напряжение и угол поворота движка потенциометра; F – сила, действующая на массу; $M_{вр}$ – вращающий момент; M_{np} – противодействующий момент.

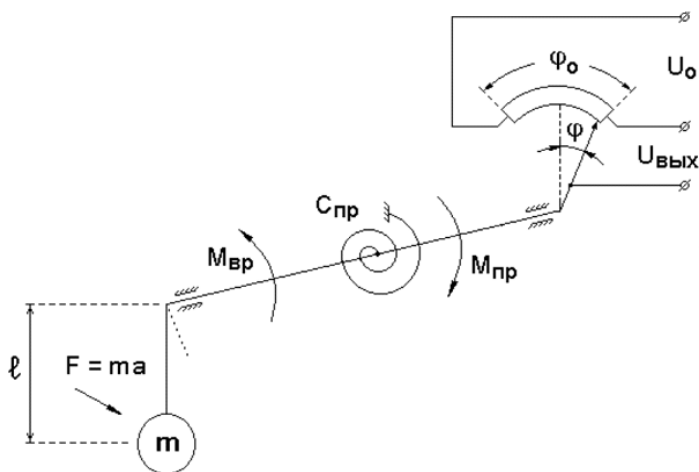


Рис. 3.1. Схема маятникового акселерометра

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите исходные данные для применения дифференциального метода расчета погрешности измерительного прибора.
2. Поясните сущность обратной задачи теории точности.
3. Поясните при каких отклонениях работает маятниковый акселерометр.
4. Поясните принцип работы маятникового акселерометра.

Практическое занятие № 4. Расчет коэффициентов влияния погрешностей звеньев измерительного прибора по структурной схеме

Цель занятия – умение определять безразмерные коэффициенты влияния погрешностей звеньев по структурной схеме измерительного прибора.

Основные теоретические положения

Для расчета чувствительности измерительного прибора по структурной схеме, необходимо чувствительность S прибора представить как функцию чувствительности звеньев

$$S = F(S_1, \dots, S_i, \dots, S_n) \quad (4.1)$$

Коэффициенты влияния ξ_i звеньев могут быть найдены поочередным дифференцированием функции по S_1, S_2, \dots, S_n по формуле

$$\xi_i = \frac{dS}{S} \frac{S_i}{S_i} \quad (4.2)$$

где S – чувствительность прибора; S_i – чувствительность i -го звена прибора.

Задание 1.

Определить безразмерные коэффициенты влияния погрешностей звеньев для структурной схемы измерительного прибора, приведенной на рис.4.1, если заданы чувствительности звеньев, приведенные в табл.4.1.

Исходные данные для расчетов приведены в табл.4.1, которые студент выбирает по последней и предпоследней цифре собственного шифра.

Таблица 4.1

Последняя цифра шифра									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количественные значения чувствительности звеньев S_i									
S_1									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	19	18	17	16	21	22	23	24	25
S_2									
9	8	7	6	10	11	12	13	14	15
Предпоследняя цифра шифра									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_3									
1									
S_4									
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

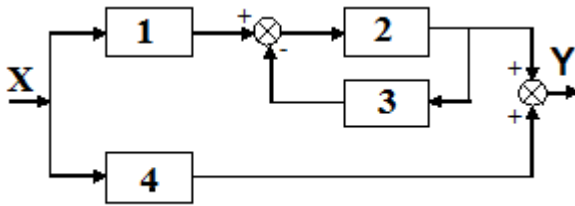


Рис.4.1. Структурная схема измерительного прибора

Указания.

Заменяем встречно-параллельные звенья 2 и 3 с отрицательной обратной связью эквивалентным звеном 5 (рис.4.1), чувствительность которого равна

$$S_5 = \frac{S_2}{1 + S_2 \cdot S_3}$$

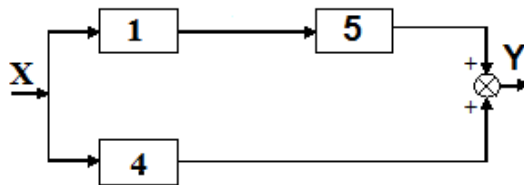


Рис.4.2. Эквивалентная структурная схема измерительного прибора

Затем, заменим последовательные звенья 1 и 5 эквивалентным звеном 6 (рис.4.3), чувствительность которого будет равна

$$S_6 = S_1 \cdot S_5 = \frac{S_1 \cdot S_2}{1 + S_2 \cdot S_3}$$

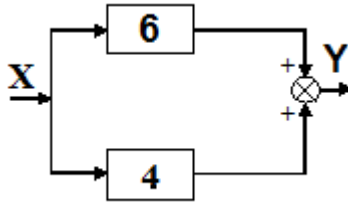


Рис.4.3. Эквивалентная структурная схема измерительного прибора

Общая чувствительность прибора будет равна

$$S = S_4 + S_6 = S_4 + \frac{S_1 \cdot S_2}{1 + S_2 \cdot S_3}$$

Дифференцируя полученное выражение для общей чувствительности прибора S по S_1 , S_2 , S_3 и S_4 и подставляя полученные частные производные

$$\frac{\partial S}{\partial S_1}, \frac{\partial S}{\partial S_2}, \frac{\partial S}{\partial S_3}, \frac{\partial S}{\partial S_4}$$

в формулу для определения коэффициента влияния i -го звена

$$\xi_i = \frac{\partial S}{\partial S_i} \frac{S_i}{S}$$

определим безразмерные коэффициенты влияния погрешностей звеньев

$$\xi_1 = \frac{S_1 S_2}{S_4 + S_2 S_3 S_4 + S_1 S_2}$$

$$\xi_2 = \frac{S_1 S_2}{(S_4 + S_2 S_3 S_4 + S_1 S_2)(1 + S_2 S_3)}$$

$$\xi_3 = -\frac{S_1 S_2^2 S_3}{(S_4 + S_2 S_3 S_4 + S_1 S_2)(1 + S_2 S_3)}$$

$$\xi_4 = \frac{S_4 + S_2 S_3 S_4}{S_4 + S_2 S_3 S_4 + S_1 S_2}$$

Подставляя в полученные безразмерные коэффициенты влияния погрешностей звеньев значения S_1 , S_2 , S_3 и S_4 находим ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 и ξ_4 .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните физический смысл чувствительности прибора.
2. Поясните порядок определения чувствительности прибора по структурной схеме.
3. Поясните порядок определения коэффициентов влияния звеньев прибора при последовательном, параллельном и встречно-параллельном соединении звеньев.
4. Поясните порядок построения эквивалентной схема измерительного прибора при определении чувствительности.

Практическое занятие № 5. Расчет погрешностей и допусков на погрешность измерительных приборов структурной схеме

Цель занятия – умение определять вероятности соответствия или вероятности несоответствия погрешности измерительного прибора допускам при заданных границах поля допуска, а также определять границы поля допуска при заданной вероятности соответствия или несоответствия измерительного прибора допускам.

Основные теоретические положения

Погрешности возникают в приборах под действием целого ряда внутренних и внешних причин, многие из которых носят случайный характер. Поэтому сами погрешности также являются случайными величинами и расчет допусков на погрешность прибора

необходимо производить методами теории вероятностей и математической статистики.

Для расчета погрешности прибора по структурной схеме необходимо знать погрешности всех его преобразующих звеньев, которые могут быть определены различными способами:

- а) расчетным путем;
- б) по результатам экспериментальных исследований образцов;
- в) по справочным данным, если используются стандартные звенья.

Если имеется партия однотипных приборов, то путем статистической обработки случайных погрешностей, полученных в одних и тех же условиях, вычисляют среднее значение погрешности χ и среднеквадратическое отклонение σ .

Если известны значения χ_i и σ_i для всех звеньев структурной схемы, то можно вычислить аналогичные показатели для суммарной погрешности прибора. Для этого применяют правила суммирования случайных величин: средние значения суммируются алгебраически, а среднеквадратические отклонения – квадратически.

Нижняя χ_n и верхняя $\chi_в$ границы допусков на суммарную погрешность прибора связаны с показателями χ и σ следующей зависимостью

$$\chi_n = \chi + t_1\sigma, \chi_в = \chi + t_2\sigma,$$

где t_1 и t_2 – безразмерные параметры, знак которых может быть положительным или отрицательным.

При анализе допусков на суммарную погрешность прибора могут встретиться две задачи:

- а) определение вероятности соответствия (или вероятности несоответствия) погрешности прибора допускам при заданных границах поля допуска χ_n и $\chi_в$;
- б) определение границ поля допуска χ_n и $\chi_в$ при заданной вероятности соответствия (или несоответствия) прибора допускам.

Задание 1.

Измерительный прибор, структурная схема которого представлена на рис.4.1 (условия задания 1 практического занятия №4),

имеет звенья с линейными характеристиками. Чувствительность звеньев (S_i) и безразмерные коэффициенты влияния погрешностей звеньев ξ_1, ξ_2, ξ_3 и ξ_i приведены в табл.4.1, а их погрешности (заданы и сведены в табл.5.1).

Требуется определить:

а) вероятность соответствия измерительного прибора допускам и процент риска, если допуск на суммарную погрешность прибора установлен $\pm\chi_\delta$ % ($\chi_n = -\chi_\delta = -1$ % , $\chi_e = +\chi_\delta = +1$ %);

б) границы поля допуска на суммарную погрешность прибора для случая, когда задан процент риска 0,27 % ($t=3$).

Исходные данные для расчетов приведены в табл.5.1, Чувствительность звеньев (S_i), студент выбирает из табл.4.1 , а коэффициент влияния погрешности звеньев ξ_i измерительного прибора студент получает при решении задания 1 практического занятия №4 и сводит их в табл.5.1

Таблица 5.1

№ звена	1	2	3	4
Чувствительность S_i				
Коэффициент влияния погрешности звена ξ_i				
Среднее значение погрешности i-го звена, χ_i %	0	-5,0	0,37	5,5
Среднее квадратическое отклонение погрешности i-го звена, σ_i %	0,2	1,5	0,2	2,0

Указания.

1. Для схемы, приведенной на рис.4.1 (задание 1 практическое занятие №4) для своего варианта задания, в табл.5.1 заносим полученные значения коэффициентов влияния погрешностей звеньев ξ_i .

2. Определим среднее значение χ и среднее квадратическое отклонение σ погрешности прибора по формулам

$$\chi = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \chi_i, \quad \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\xi_i \cdot \sigma_i)^2}.$$

3. Определяем параметры t_1 и t_2 для заданных границ поля

допуска ($\pm\chi_d$ %) по формулам

$$t_1 = \frac{(\chi_n - \chi)}{\sigma}, \quad t_2 = \frac{(\chi_6 - \chi)}{\sigma}.$$

4. По табл.5.2 с применением интерполяции находим значение функции Лапласа $L(t_1)$ и $L(t_2)$.

5. Определяем вероятность того, что суммарная погрешность прибора (χ) будет находиться в пределах $\pm\chi_d$ по формуле

$$P = L(t_2) - L(t_1)$$

6. Определим процент риска по формуле

$$Q = 100 \% - P (\%)$$

7. Определим границы поля допуска на суммарную погрешность прибора, обеспечивающие заданный процент риска 0,27 % ($t=3$) по формулам

$$\chi_n = \chi - 3\sigma, \quad \chi_6 = \chi + 3\sigma.$$

Таблица 5.2

Десятые доли t	t				
	0	1	2	3	4
0	0,000	0,3413	0,4772	0,4986501	0,4999683
1	0,0398	0,3643	0,4821	0,4990324	0,4999793
2	0,0793	0,3849	0,480996	0,4993129	0,4999867
3	0,1179	0,4032	0,4892759	0,4995166	0,4999915
4	0,1554	0,4192	0,4918025	0,4996631	0,4999946
5	0,1916	0,4332	0,4937903	0,4997674	0,4999966
6	0,2257	0,4452	0,4953388	0,4998409	0,4999979
7	0,2580	0,4554	0,4965330	0,4998992	0,4999989
8	0,2881	0,4641	0,4974449	0,4999274	0,4999994
9	0,3159	0,4713	0,4981342	0,4999519	0,4999997

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните порядок определения допусков на погрешность прибора.

2. Поясните порядок определения вероятности соответствия погрешности прибора допускам.

3. Поясните понятие процент риска.

4. Поясните порядок определения границ поля допусков и ширину поля допусков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В методических указаниях приводятся 5 практических занятий, которые построены по алгоритму: тема и цель занятия; основные теоретические положения, включая справочный материал; 2 – 3 практических задания и указания к их выполнению; контрольные вопросы, необходимые для самопроверки студентов при подготовке к занятию.

Для понимания основных вопросов, связанных с расчетом статических характеристик измерительных приборов, а также расчета погрешностей и допусков на погрешность, проведения метрологического анализа, студентам необходимо знать основные положения лекционного материала, а также ряда ранее изученных общепрофессиональных дисциплин метрологической направленности.

Методические указания «Основы приборостроения: Методы расчета и определения статических характеристик измерительных приборов» позволит студентам определить роль и место курса в процессе проектно-конструкторской и производственно-технологической деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Боднер В. А.* Приборы первичной информации : учебник для авиационных вузов / В. А. Боднер. – М. : Машиностроение, 1981. – 344 с.
2. *Браславский Д. А.* Точность измерительных устройств / Д. А. Браславский, В. В. Петров. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.
3. ГОСТ 8.401. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
4. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 2001. 25 с.
5. *Гуткин Л. С.* Проектирование радиосистем и радиоустройств: учеб. пособие для вузов / Л. С. Гуткин. – М. : Радио и связь, 1980. – 288 с.
6. *Куликовский К.Л.* Методы и средства измерений: учебное пособие для вузов/К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.
7. *Калиниченко А.В.* Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике: Проектирование и разработка [Электронный ресурс] учебно-практическое пособие / *А.В. Калиниченко, Н.В. Уваров, В.В. Дойников.* – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 564 с. – Режим доступа: [444435](#). – Загл. с экрана.
8. *Латыев С.М.* Конструирование точных (оптических) приборов [Электронный ресурс]: учеб. пособие – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 560 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/60655>. – Загл. с экрана.
9. *Муханин Л.Г.* Схемотехника измерительных устройств. СПб, Лань, 2009.
10. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л: Энергоатомиздат, 1991.
11. Проектирование приборов, систем и измерительно-вычислительных комплексов: конспект лекций для студентов специальности 20010365/ сост. В. Н. Шивринский. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 116 с.
12. *Цапенко, М. П.* Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование / М. П. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 439 с.

Содержание

Введение.....	3
Практические занятия.....	5
Практическое занятие № 1. Расчет статической функции преобразования аналогового измерительного преобразователя.....	5
Практическое занятие № 2. Расчет чувствительности измерительных приборов прямого и уравнивающего преобразования..	12
Практическое занятие № 3. Расчет статической характеристики маятникового акселерометра.....	20
Практическое занятие № 4. Расчет коэффициентов влияния погрешностей звеньев измерительного прибора по структурной схеме	23
Практическое занятие № 5. Расчет погрешностей и допусков на погрешность измерительных приборов структурной схеме.....	27
Заключение.....	31
Библиографический список.....	32

ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 27.03.01*

Сост.: *И.И. Сутько*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
метрологии, приборостроения и управления качеством

Ответственный за выпуск *И.И. Сутько*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 17.05.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,9. Усл.кр.-отт. 1,9. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 75 экз. Заказ 413.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2