

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Южно-Российский государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И.Платова**

**МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ
И ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**Учебно-методическое пособие
для практических занятий**

**Новочеркасск
ЮРГПУ(НПИ)**

2017

УДК 006.91 (076.5)

Рецензент – канд. техн. наук К.Ю. Соломенцев

Григорьян С.Г.

Метрология, стандартизация и технические измерения: учебно-методическое пособие для практических занятий/Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И.Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2017. – 52 с.

Практические занятия посвящены нахождению погрешностей измерения, изучению наиболее распространенных средств измерений электрических и неэлектрических величин. Приведены краткие сведения из теории, практические задания и контрольные вопросы.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся в бакалавриате по направлениям «11.03.04 Электроника и наноэлектроника», «11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также студентов, изучающих дисциплину "Метрология и измерительная техника" в бакалавриате по направлению «27.03.04 Управление в технических системах».

Пособие оформлено в соответствии с требованиями к текстовым документам ЕСКД и выпускным квалификационным работам.

© Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М.И.Платова, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Занятие № 1. Определение погрешностей однократных прямых измерений.....	4
Занятие № 2. Классы точности средств измерений и их использование при оценке погрешности.....	15
Занятие № 3. Нахождение погрешностей косвенных измерений.....	22
Занятие № 4. Обработка результатов прямых многократных измерений.....	26
Занятие № 5. Измерение параметров электрического тока и напряжения.....	32
Занятие № 6. Принцип действия и практическое применение измерительных преобразователей температуры.....	39
Занятие № 7. Принцип действия и практическое применение тензорезисторных датчиков.....	46

Занятие № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОДНОКРАТНЫХ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель занятия: изучить виды погрешностей, определение составляющих погрешности однократных прямых измерений, правила суммирования погрешностей.

Виды погрешностей

Понятие погрешности измерения связано с такими терминами как «истинное» и «действительное» значения физической величины.

Истинное значение физической величины $x_{\text{ист}}$ – это значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в количественном и качественном отношении данную физическую величину. Истинное значение физической величины всегда неизвестно, поскольку дать его абсолютно точную количественную оценку невозможно.

Пример. Очевидно, что металлический стержень с параллельными торцами имеет некое значение длины, но нам оно неизвестно. Измерив длину стержня с помощью линейки, мы получим, например, 32 мм. Измерение с помощью штангенциркуля даст результат 32,2 мм, с помощью микрометра – 32,235 мм и так далее. Всякий раз более совершенное средство измерений позволяет уточнить результат. И поскольку нет предела совершенству, всегда существует возможность уточнения предыдущего результата. То есть истинное значение величины – это некий объективно существующий, но не достижимый идеал, не применимый при решении практических задач.

Действительное значение физической величины $x_{\text{д}}$ – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в данной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Примеры определения действительного значения физической величины для различных типов измерительных задач будут даны ниже.

Погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой физической величины [1].

Поэтому истинное значение величины неизвестно, на практике

вместо него используют действительное значение физической величины и погрешность измерения $\Delta x_{\text{изм}}$ определяют по формуле

$$\Delta x_{\text{изм}} = x_{\text{изм}} - x_{\text{д}}, \quad (1.1)$$

где $x_{\text{изм}}$ и $x_{\text{д}}$ – измеренное и действительное значения величины.

Погрешность, определяемая по формуле, (1.1) называется абсолютной. Формула (1.1) далеко не всегда может быть применена для практических расчетов, поскольку значение $x_{\text{д}}$ также часто неизвестно. Поэтому наряду с формулой (1.1), определяющей суммарную абсолютную погрешность измерения, используют ряд других вариантов описания (видов) погрешностей.

Использование различных видов погрешностей позволяет:

- сделать оценку точности измерения более наглядной;
- выявить отдельные составляющие суммарной погрешности измерения, что способствует их снижению;
- оценить суммарную погрешность средств измерений (СИ) в реальных условиях применения с учетом внешних влияющих факторов;
- упростить процесс нормирования метрологических характеристик с учетом специфики конкретных средств измерений.

Погрешности классифицируют по способу выражения, по источнику возникновения и другим признакам (таблица 1.1). Некоторые виды погрешностей используются либо только для результата измерений, либо только для средств измерений.

Таблица 1.1 – Классификация погрешностей

№	Признак	Виды погрешностей	
		Измерений	Средств измерений
1	По способу выражения	Абсолютная Относительная	Абсолютная Относительная Приведенная
2	По источнику возникновения	Метода измерений Инструментальная Субъективная	–
3	По характеру проявления	Систематическая Случайная Грубая (промах)	Систематическая Случайная
4	В зависимости от условий применения средства измерений	–	Основная Дополнительная
5	В зависимости от характера поведения измеряемой физической величины в процессе измерения	–	Статическая Динамическая

1. По способу выражения различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности.

Абсолютная погрешность Δ – это погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины и определяемая по формуле (1.1). По формуле (1.1) погрешность рассчитывается в тех случаях, когда действительное значение физической величины известно – это задачи поверки и градуировки средств измерений. В таких задачах на вход средства измерений подают эталонное значение физической величины, которое и принимается за x_d . Разность показаний средства измерений и значения эталона и будет представлять собой абсолютную погрешность с соответствующим знаком:

$$\Delta = x_{\text{изм}} - x_d.$$

Пример. Необходимо определить погрешность весов. Для этого на платформу весов ставят эталонную гирию 1 кг и снимают показания весов – 1,002 кг. По формуле (1.1) находим, что абсолютная погрешность весов в данной точке шкалы; $\Delta = 1,002 - 1,000 = 0,002$ кг. При этом не принимается во внимание, что масса гири имеет некоторую допустимую погрешность, зависящую от класса точности гири. Если класс точности гири соответствует требованиям к эталону для данных конкретных весов, то считается, что погрешность массы гири равна нулю. Масса гири здесь представляет собой действительное значение массы, относительно которого рассчитывается погрешность.

Другой пример. Погрешность рабочего вольтметра определяют методом сличения с эталонным вольтметром. Для этого оба вольтметра подключают к одному и тому же источнику напряжения. Считается, что погрешность эталонного вольтметра равна нулю, то есть его показание представляет собой действительное значение напряжения. Пусть рабочий вольтметр показывает 4,035 В, а эталонный вольтметр – 4,060 В, тогда абсолютная погрешность рабочего вольтметра

$$\Delta = 4,035 - 4,060 = - 0,025 \text{ В.}$$

Во всех задачах подобных, описанным в этих двух примерах, погрешность эталона должна быть в нормированное число раз меньше погрешности рабочего средства измерений. Часто используется отношение погрешностей эталона и рабочего средства измерений 1/3 и менее (1/4; 1/5 и т. д.).

При рабочих измерениях эталон не используется, действительное значение величины x_D не известно и формула (1.1) неприменима. В таких задачах абсолютную погрешность рассчитывают на основе известной относительной погрешности δ или приведенной погрешности γ средства измерений, которые в свою очередь определяют на основе класса точности данного рабочего средства измерений.

При многократном измерении в качестве действительного значения x_D принимается среднее арифметическое ряда отдельных измерений, входящих в данный ряд.

Относительная погрешность – это погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности Δ к действительному значению величины. Относительную погрешность δ находят из выражения

$$\delta = \frac{\Delta}{x_D} 100 \% \quad (1.2)$$

Относительную погрешность допускается выражать в относительных единицах, в этом случае в формуле (1.2) множитель 100 % отсутствует.

Приведенная погрешность – это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерений отнесена к условно принятому значению X_N , постоянному на всем диапазоне измерений или его части, так называемому нормирующему значению;

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \quad (1.3)$$

где X_N – нормирующее значение. За нормирующее значение чаще всего принимают верхний предел измерений средства измерений.

В зависимости от знака Δ , значения δ и γ могут быть как положительными, так и отрицательными.

2. По источнику возникновения различают погрешность метода измерений, инструментальную и субъективную погрешности.

Погрешность метода измерений (методическая погрешность) – это составляющая погрешности измерения, обусловленная несовершенством принятого метода измерений. Отметим, что в современных нормативных документах [1], вместо термина «методическая погрешность» используется термин «погрешность метода измерений». Вместе с тем, в многочисленной литературе и некоторых государ-

ственных стандартах по-прежнему употребляется термин «методическая погрешность». Погрешность метода измерений в основном проявляется как систематическая погрешность, но иногда может проявляться и как случайная погрешность.

Особенностью погрешностей метода измерений является их индивидуальность, связанная не только с применением данного метода или физического принципа, но и с его конкретным воплощением. Из многих возможных причин погрешности метода измерений укажем две характерные причины:

- неточность модели физического процесса, на котором базируется средство измерений;

- неверное применение средства измерений.

В нормативной документации на СИ погрешность метода измерений обычно не указывается, однако могут быть приведены методические рекомендации по правильному применению данного СИ.

Пример. При взвешивании тела на аналитических рычажных весах будет допущена систематическая методическая погрешность, если не будет вноситься поправка на различие выталкивающих сил, действующих со стороны воздуха на взвешиваемое тело и гири. Действительно, на взвешиваемое тело и гири действуют направленные вверх силы Архимеда. Объемы взвешиваемого тела и гирь в общем случае различны, соответственно будут отличаться и действующие на них выталкивающие силы.

Пример. У термометра, размещенного на солнце, показания будут завышенными из-за дополнительного нагрева солнечным излучением. Термометр будет нагрет сильнее, чем окружающий воздух, методическая погрешность имеет знак «плюс».

Пример. При измерении напряжения вольтметром по его входной цепи протекает ток, зависящий от входного сопротивления вольтметра. Поэтому измеренное напряжение будет меньше действительного значения. Методическая погрешность в этом случае имеет знак «минус» и может быть достаточно точно рассчитана по входному сопротивлению вольтметра и выходному сопротивлению контролируемой цепи. Для снижения методической погрешности входное сопротивление прибора должно быть как можно больше, по сравнению с выходным сопротивлением контролируемой цепи (в идеале сопротивление вольтметра должно быть бесконечно большим).

Инструментальная погрешность – это составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого СИ. Например, инструментальная погрешность может быть обусловлена нелинейностью преобразования сигнала, инерционностью СИ, его нестабильностью, изменением условий эксплуатации (температуры окружающей среды и других внешних воздействующих факторов). Инструментальная погрешность складывается из *основной* и *дополнительных* погрешностей, рассмотренных ниже.

Субъективная погрешность – это составляющая систематической погрешности измерения, обусловленная индивидуальными особенностями конкретного оператора. Например, при снятии показаний по стрелочному отсчетному устройству большое значение имеет правильное направление взгляда оператора. Другой пример. При постоянном измеряемом напряжении показания цифрового вольтметра хаотически изменяются на 2-3 последних цифры. Один оператор будет брать средние значения, другой – минимальные (максимальные) значения.

3. По характеру проявления различают *систематическую, случайную и грубую* погрешности.

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. Систематические погрешности могут быть предсказаны, обнаружены и существенно уменьшены путем введения поправок при определении результата измерений.

Поправки определяются и вычисляются с некоторой погрешностью, часть систематических погрешностей оказывается необнаруженной, поэтому существует понятие *неисключенной систематической погрешности*.

Случайная погрешность – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений физической величины постоянного размера, проведенных с одинаковой тщательностью в одинаковых условиях. Случайная погрешность неустранима и проявляется в виде разброса результатов многократных измерений. Предельные значения случайной погрешности могут быть оценены на основе теории случайных процессов и математической статистики. Уменьшение слу-

чайной погрешности возможно путем проведения многократных измерений и усреднения их результатов.

Грубая погрешность (промах) – это погрешность, которая при исправных средствах измерений и корректных действиях оператора не должна появляться. Причины промахов – неправильная запись показаний и иные ошибки оператора, сбои в работе аппаратуры, скачки напряжения в сети, сотрясения пола и другие. При однократном измерении промах может быть обнаружен только путем логического анализа или сопоставления результата с априорным представлением о нем. В сомнительных случаях проводят дополнительные измерения, при необходимости скорректировав методику их выполнения. При многократном измерении одной и той же величины постоянного размера промахи проявляются в том, что результаты отдельных измерений, входящих в один ряд, резко отличаются от остальных результатов этого ряда. Такие промахи выявляют с помощью специальных критериев при обработке результатов измерений. При последующей статистической обработке результат, признанный промахом, не учитывают.

4. В зависимости от условий применения СИ различают основную и дополнительную погрешности.

Основная погрешность СИ – это погрешность СИ, применяемого в нормальных условиях.

Дополнительная погрешность СИ – составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений. Примеры: дополнительные погрешности, вызванные изменением температуры окружающей среды, напряжения питания и других влияющих факторов.

5. В зависимости от характера изменения измеряемой величины различают статическую и динамическую погрешности.

Статическая погрешность СИ – погрешность средства измерений, применяемого при измерении физической величины, принимаемой за неизменную. Иными словами, статическая погрешность – это погрешность статического измерения. Статическое измерение имеет место, если измеряемая величина постоянна или изменяется настолько медленно, что этим изменением в процессе измерения можно пренебречь.

Пример. Масса человека не является постоянной величиной. Однако в процессе взвешивания масса человека не успевает заметно измениться, поэтому мы считаем, что это статическое измерение.

Динамическая погрешность СИ – погрешность средства измерений, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерения) физической величины. Эта дополнительная динамическая составляющая погрешности обусловлена инерционными свойствами СИ, не способного отслеживать быстрое изменение измеряемой величины. Отметим, что лишь немногие виды СИ пригодны для проведения динамических измерений.

Пример. Мы хотим зарегистрировать изменение температуры газов, образующихся при быстром горении. Однако датчик температуры не может моментально прогреться до измеряемой температуры, поэтому мгновенные измеренные температуры будут ниже действительных значений (динамическая погрешность в данном случае отрицательна).

Расчет суммарной погрешности СИ и результата измерений

Суммарная инструментальная погрешность в реальных условиях применения средства измерений может рассчитываться на основе двух моделей погрешности [2]. Модель I является наиболее полной и учитывает пять составляющих погрешности средства измерений: систематическую составляющую основной погрешности; случайную составляющую основной погрешности; случайную составляющую основной погрешности, обусловленную гистерезисом; дополнительные погрешности, обусловленные действием влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала; динамическую погрешность.

На практике в большинстве случаев используется более простая модель II:

$$\Delta_{\text{и}} = \Delta_{\text{о}} * \sum_1^n \Delta_{\text{доп}i} * \Delta_{\text{дин}}. \quad (1.4)$$

где $\Delta_{\text{и}}$ – суммарная инструментальная погрешность средства измерений;

$\Delta_{\text{о}}$ – основная погрешность средства измерений;

$\Delta_{\text{доп}i}$ – i -я дополнительная погрешность средства измерений;

n – число дополнительных погрешностей;

$\Delta_{\text{дин}}$ – динамическая погрешность средства измерений.

Здесь значок * обозначает объединение составляющих погрешностей измерения (алгебраическое, геометрическое).

Для конкретных средств измерений и условий их применения некоторые погрешности могут отсутствовать. Нами при решении задач будет использоваться модель II.

Критерием выбора того или иного закона объединения погрешностей может являться их корреляция между собой. Коррелированные погрешности имеют общую причину, поэтому при изменении одной погрешности, одновременно изменяется и другая погрешность. Если отдельные составляющие инструментальной погрешности коррелированы между собой, то применяется суммирование их модулей:

$$\Delta_{\text{и}} = |\Delta_{\text{о}}| + \left| \sum_1^n \Delta_{\text{доп}i} \right| + |\Delta_{\text{дин}}|. \quad (1.5)$$

Выражение (1.5) дает оценку максимально возможного значения инструментальной погрешности, если все составляющие будут иметь одинаковый знак. Такая оценка погрешности часто является завышенной.

Если нет указаний, что отдельные погрешности коррелированы между собой, то применяется их геометрическое суммирование:

$$\Delta_{\text{и}} = \sqrt{\Delta_{\text{о}}^2 + \left(\sum_1^n \Delta_{\text{доп}i} \right)^2 + \Delta_{\text{дин}}^2}. \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) учитывает, что отдельные составляющие могут иметь различный знак и в той или иной степени будут компенсировать друг друга.

Суммарная погрешность результата измерений в общем случае определяется путем геометрического суммирования отдельных составляющих. Например, если помимо инструментальной погрешности имеется неисключенная погрешность метода измерений, то суммарную погрешность находим по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{м}}^2 + \Delta_{\text{и}}^2}, \quad (1.7)$$

где Δ – суммарная погрешность результата измерений;

$\Delta_{\text{м}}$ – неисключенная погрешность метода измерений (неисключенная систематическая погрешность);

$\Delta_{\text{и}}$ – инструментальная погрешность.

Задачи

1. На платформу весов поставили эталонную гирю весом 1 кг. Весы показали значение 1,005 кг. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения. Найти приведенную погрешность весов, если верхний предел измерения (нормирующее значение) равен 5 кг.

2. При поверке методом сличения последовательно включили поверяемый и эталонный амперметр. Эталонный амперметр показал 2,4 А, поверяемый амперметр показал 2,45 А. Предел измерений поверяемого амперметра 3 А. Для поверяемого амперметра определить абсолютную, относительную и приведенную погрешности.

3. Поверяемый термометр в тающем льду показал 0,5 °С, а в кипящей воде 101 °С. Предел измерений термометра 150 °С. Определить абсолютные погрешности термометра при этих температурах и максимальную приведенную погрешность термометра.

4. Приведенная погрешность манометра равна 0,5 %, диапазон измерения 0...10 МПа. Определить относительные погрешности измерения давлений 1 МПа и 9 МПа.

5. Определить допустимую приведенную погрешность акселерометра для измерения виброускорения 60 м/с² с погрешностью ± 2 м/с². Диапазон измерения акселерометра 0...100 м/с².

6. Напряжение на выводах солнечной батареи должно превышать 1,20 В. При приемочных испытаниях батареи было получено значение 1,21 В. Можно ли обосновано утверждать, что солнечная батарея годна к эксплуатации, если измерение произведено с относительной погрешностью 0,25 %?

7. На бензоколонке заливают бензин с абсолютной систематической погрешностью $\Delta = - 0,1$ л. Вычислите относительные погрешности, возникающие при покупке 16 л и 40 л бензина.

8. Оценить абсолютную погрешность измерения температуры человеческого тела, если после начала измерения прошло время $t = 3$ мин. Показания термометра изменяются по экспоненциальному закону

$$\Theta = (\Theta_{\text{т}} - \Theta_{\text{окр}}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где температура тела $\Theta_T = 36,6$ °С, температура окружающего воздуха $\Theta_{\text{окр}} = 23$ °С, постоянная времени $T = 1$ мин.

Инструментальной погрешностью термометра пренебречь.

9. Используя условия задачи 8, оцените минимально необходимое время измерения температуры человеческого тела, чтобы относительная погрешность не превышала 0,2 %.

10. Основная относительная погрешность измерителя сопротивления равна 0,1 %. Определить относительную погрешность измерителя при температуре 45 °С, если его дополнительная относительная погрешность от изменения температуры равна $0,005(\Theta - \Theta_n)$, где Θ – температура окружающей среды; Θ_n – нормальная температура, равная 20 °С.

Контрольные вопросы

1. Как определяются абсолютная, относительная и приведенная погрешности?

2. В каких случаях для определения абсолютной погрешности применима формула (1.1)?

3. Что такое истинное и действительное значения физической величины?

4. Что такое погрешность метода измерений? Приведите примеры.

5. Что такое инструментальная погрешность? От чего она зависит?

6. Приведите примеры субъективных погрешностей.

7. Что такое систематическая погрешность? Как она может быть снижена?

8. Чем вызвана случайная погрешность? Можно ли ее устранить, оценить предельное значение случайной погрешности?

9. Как выявляются грубые погрешности (промахи) в результатах измерений? Как поступают с грубыми погрешностями?

10. Что характеризуют дополнительные погрешности? Приведите примеры.

11. Что характеризуют статическая и динамическая погрешности?

12. Что такое основная погрешность?

13. Как определяется суммарная погрешность результата измерений?

Занятие № 2

КЛАССЫ ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТИ

Цель занятия: научиться определять погрешность измерений по классу точности средства измерений.

Способы нормирования класса точности средств измерений

В большинстве случаев погрешность измерений оценивают на основании класса точности средства измерений (СИ). Зная класс точности, можно также оценить, подойдет ли данное СИ для решения конкретной задачи.

Класс точности – это обобщенная характеристика данного типа средств измерений, отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Класс точности дает возможность судить о том, в каких пределах находится погрешность СИ данного типа.

Класс точности может нормироваться в виде пределов *приведенных, относительных* или *абсолютных погрешностей*.

В большинстве случаев используют нормирование пределов приведенной или относительной основной погрешности. Это позволяют выражать пределы допускаемой погрешности числом, которое остается одним и тем же для СИ одного уровня точности, но с различными верхними пределами измерений.

Нормирование пределов абсолютной основной погрешности применяется, если погрешность таких измерений принято выражать в единицах измеряемой величины или в делениях шкалы. Например, пределы допускаемых погрешностей мер массы или длины.

Выбор способа задания класса точности определяется видом зависимости абсолютной погрешности СИ от значения измеряемой величины (рисунок 2.1). На рисунке 2.1 обозначено: x – значение измеряемой физической величины, Y – сигнал на выходе средства измерений (показание, электрический или иной сигнал). Штриховой линией показана номинальная статическая характеристика (функция преобразования) средства измерений. Отклонение значения Y от данной номинальной характеристики представляют собой абсолютную по-

грешность Δ . Значения Y с учетом погрешности $\pm\Delta$ лежат в пределах заштрихованной области.

Рассмотрим три основных случая.

1. Границы абсолютной погрешности можно полагать неизменными $\Delta = \pm a$ (рисунок 2.1 а). Погрешность данного вида называют аддитивной.

Класс точности таких средств измерений соответствует пределу основной приведенной погрешности

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} 100\% = \pm p, \quad (2.1)$$

где Δ – пределы допускаемой абсолютной погрешности;

X_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ ;

p – положительное число, выбираемое из стандартизованного ряда.

Отметим, что относительная погрешность таких СИ является величиной переменной и достигает максимума в начале шкалы.

Так указывают класс точности стрелочных вольтметров и амперметров, аналого-цифровых преобразователей (погрешность квантования) и других приборов.

2. Границы относительной погрешности можно полагать неизменными $\delta = \pm q$ (рисунок 2.1 б). Погрешность данного вида называют мультипликативной.

Класс точности таких средств измерений соответствует пределу относительной погрешности, определяемой по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} 100\% = \pm q, \quad (2.2)$$

где x – измеренное значение физической величины;

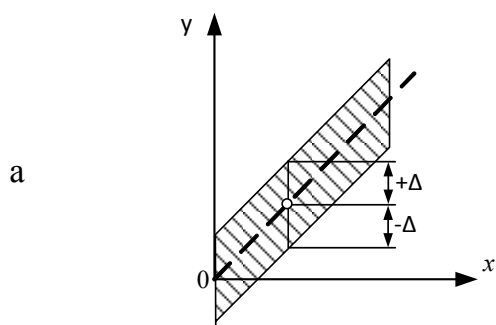
q – положительное число, выбираемое из стандартизованного ряда.

Отметим, что абсолютная погрешность таких СИ изменяется по закону $\Delta = \pm bx$.

Так указывают класс точности масштабных преобразователей, делителей напряжения, шунтов, усилителей.

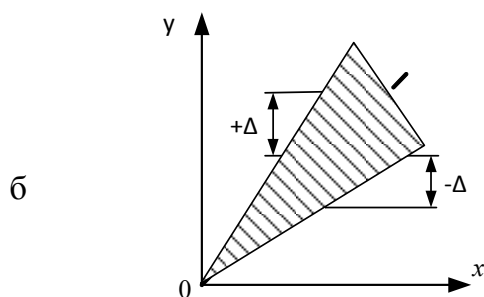
3. Границы абсолютной погрешности можно полагать изменяющимися линейно $\Delta = \pm(a+bx)$, рисунок 2.1 в. В данном случае сред-

ство измерений имеет одновременно и аддитивную и мультипликативную погрешности, сопоставимые по величине.



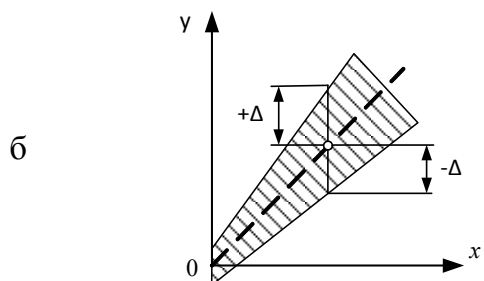
Класс точности равен пределу приведенной погрешности:

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} 100\% = \pm p$$



Класс точности равен пределу относительной погрешности:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} 100\% = \pm q$$



Класс точности равен пределу относительной погрешности:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} 100\% = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_k}{x} \right| - 1 \right) \right]$$

Рисунок 2.1

Класс точности таких средств измерений соответствует пределу относительной погрешности, который, в отличие от предыдущего случая, определяется по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} 100\% = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_k}{x} \right| - 1 \right) \right]. \quad (2.3)$$

где X_k – больший (по модулю) из пределов измерений;

c и d – положительные числа, выбираемые из стандартизованного ряда.

Так указывают класс точности цифровых вольтметров, омметров и других приборов.

Обозначение классов точности по ГОСТ 8.401-80

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме приведенной погрешности или относительной погрешности, классы точности в документации обозначают числами, которые равны этим пределам, выраженным в процентах. Обозначение класса точности в этом случае дает непосредственное указание на предел допускаемой основной погрешности.

Правила построения и примеры обозначения классов точности в документации и на средствах измерений приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Форма выражения погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности	
			В документации	На средстве измерений
Приведенная	По формуле (2.1)	$\gamma = \pm 1,5$	Класс точности 1,5	1,5
Относительная	По формуле (2.2)	$\delta = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	0,5
	По формуле (2.3)	$\delta = \pm [0,2 + 0,1 \left(\left \frac{X_k}{x} \right - 1 \right)]$	Класс точности 0,2/0,1	0,2/0,1

Правила выбора нормирующего значения X_N

1. Правила выбора нормирующего значения указаны в ГОСТ 8.401-80. Для СИ с равномерной или степенной шкалой, а также для измерительных преобразователей, если нулевое значение входного (выходного) сигнала находится на краю или вне диапазона измерений, нормирующее значение устанавливают равным большему из пределов измерений: $X_N = 10$ (рисунок 2.2, а).

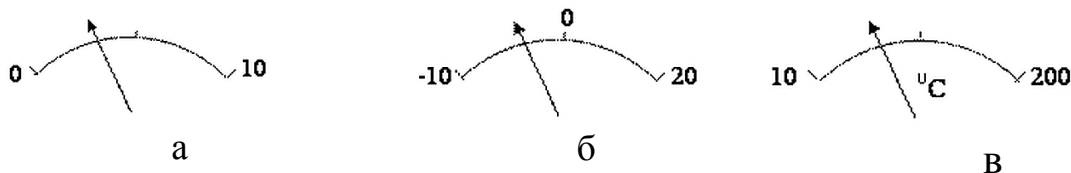


Рисунок 2.2

2. Если нулевое значение находится внутри диапазона измерений, то нормирующее значение берется равным большему из модулей пределов измерений: $X_N = 20$ (рисунок 2.2, б).

3. Для электроизмерительных приборов с равномерной шкалой, практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений X_N допускается устанавливать равным сумме модулей пределов измерений:

$$X_N = |-10| + |20| = 30 \text{ (рисунок 2.2, б).}$$

4. Для средств измерений, для которых принята шкала с условным нулем (например, в градусах Цельсия), нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений: $X_N = |200 - 10| = 190$ (рисунок 2.2, в).

Пример. Для милливольтметра термоэлектрического термометра с пределами измерений от 200 до 600 °С нормирующее значение $X_N = 400$ °С.

5. Для средств измерений с установленным номинальным значением нормирующее значение равно этому номинальному значению.

Пример. Для частотомеров с диапазоном измерений 45–55 Гц и номинальной частотой 50 Гц нормирующее значение $X_N = 50$ Гц.

Расчет погрешности измерения по классу точности СИ

Рассмотрим три наиболее распространенных случая.

1. Класс точности СИ задан одним числом, например: 1,5.

В этом случае класс точности равен значению основной приведенной погрешности СИ, выраженной в процентах ($K = \gamma$).

Абсолютная Δ и относительная δ погрешности измерения могут быть найдены на основе формул

$$K = \gamma = \pm \frac{\Delta}{X_N} 100\%; \quad (2.4)$$

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{x} 100\%, \quad (2.5)$$

где K – класс точности СИ;

X_N – нормирующее значение;

x – значение измеряемой величины (измеренное значение).

Если в (2.4) выразить Δ через K и подставить в (2.5), то получим еще одну формулу для определения относительной погрешности измерения, %

$$\delta = \pm K \frac{X_N}{x}. \quad (2.6)$$

2. Класс точности задан числом внутри кружка, например: $\textcircled{0,5}$.

В этом случае класс точности равен пределу относительной погрешности СИ, выраженной в процентах ($K = \delta$). Максимальная абсолютная погрешность может быть найдена по формуле (2.6).

3. Класс точности задан двумя числами, например: 0,2/0,1.

В этом случае указанные числа равны коэффициентам c , d в формуле

$$\delta = \pm [c + d \left(\left| \frac{X_k}{x} \right| - 1 \right)], \quad (2.7)$$

где X_k – больший (по модулю) из пределов измерений.

В приведенном примере $c = 0,2$; $d = 0,1$. Абсолютная погрешность определяется из формулы (2.5).

Задачи

1. Вольтметр имеет предел измерения 100 В. Класс точности вольтметра 0,5. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения напряжения 70 В.

2. Верхний предел измерений весов 150 кг, класс точности 0,25. Весы показывают 78 кг. Каковы максимальные относительная и абсолютная погрешности взвешивания?

3. Вольтметр имеет предел измерения 300 В. Класс точности вольтметра $\textcircled{0,5}$. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения напряжения 260 В.

4. Омметр имеет класс точности $\textcircled{1,0}$. Какой будет абсолютная погрешность измерения сопротивления 1200 Ом?

5. Вольтметр имеет предел измерения 150 В. Класс точности вольтметра 0,2/0,1. Какова будет максимальная относительная и абсолютная погрешности измерения напряжения 95 В.

6. Цифровой вольтметр показывает значение напряжения 48,3 В. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения напряжения. Класс точности вольтметра 0,5/0,15; предел измерения 100 В.

7. Амперметр имеет диапазон измерений от 0 до 150 А и класс точности 1,5. При поверке методом сличения его показаний с показаниями эталонного амперметра были получены следующие результаты:

Поверяемый, А	20	40	60	80	100	125	150
Эталонный, А	19,8	41,5	58,2	81,2	99,7	122,8	148,6

Определить соответствие амперметра классу точности.

8. Вольтметр имеет предел измерений 100 В и класс точности 2,5. При поверке методом сличения его показаний с показаниями эталонного вольтметра были получены следующие результаты:

Поверяемый, В	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Эталонный, В	11	20	30,5	41	52	61	67	78	89	1-1

Определить соответствие вольтметра классу точности.

9. Микроамперметр на 100 мкА имеет шкалу в 200 делений. Определить возможную погрешность в делениях шкалы, если на шкале прибора имеется обозначение класса точности 1,0.

10. Манометр со шкалой на 300 делений имеет класс точности 1,5. При постукивании по корпусу прибора смещение стрелки не превышает 0,1 деления шкалы. Как соотносятся погрешность отсчета, вызванная постукиванием, с допустимой погрешностью манометра?

11. Для измерения напряжения от 50 до 130 В с относительной погрешностью не более 5 % был приобретен вольтметр с верхним пределом измерения 150 В и классом точности 1,0. Удовлетворяет ли он поставленным условиям?

12. Весы имеют класс точности 0,2 и шкалу на 500 делений. Определить допускаемые относительные погрешности этих весов на десятом и трехсотом делениях шкалы.

Контрольные вопросы

1. Для чего используется класс точности?

2. Что означают обозначения класса точности: $\textcircled{1,0}$; 1,0?
3. Как определить относительную и абсолютную погрешности измерения, если прибор имеет класс точности 0,5?
4. Как определить относительную и абсолютную погрешности измерения, если прибор имеет класс точности $\textcircled{1,0}$?
5. Как определить относительную погрешность измерения, если прибор имеет класс точности 0,5/0,15?
6. Как определяется погрешность при поверке методом сличения?

Занятие № 3

НАХОЖДЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель занятия: научиться определять погрешности косвенных измерений.

Основные расчетные соотношения

Косвенное измерение – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Косвенные измерения выполняют тогда, когда прямые измерения данной величины затруднены или невозможны, либо если косвенные измерения дают более высокую точность, чем прямые.

Пример – определение плотности D тела цилиндрической формы по результатам прямых измерений массы m , высоты h и диаметра цилиндра d , связанных с плотностью уравнением

$$D = \frac{m}{0,25\pi d^2 h}.$$

Во многих случаях вместо термина *косвенное измерение* применяют термин *косвенный метод измерений*.

Пусть искомая физическая величина Y определяется по результатам прямых измерений физических величин a, b, c . Величина Y связана с величинами a, b, c функциональной зависимостью $Y = F(a, b, c)$. Величины a, b, c измерены с абсолютными погрешностями $\Delta a, \Delta b, \Delta c$.

При произвольном виде функции $Y = F(a, b, c)$ для оценки предела абсолютной погрешности измерения величины Y используется выражение

$$\Delta Y = \left| \frac{\partial F}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial F}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial F}{\partial c} \right| \Delta c. \quad (3.1)$$

Рассмотрим наиболее распространенные частные случаи.

1. Искомая величина Y связана с величинами a, b, c зависимостью вида сложение-вычитание.

Например, при $Y = a + b - c$ по формуле (3.1) получим

$$\Delta Y = \Delta a + \Delta b - \Delta c.$$

Учитывая, что знаки погрешностей $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ обычно бывают заранее неизвестны, для получения гарантированной (предельной) оценки абсолютной погрешности косвенного измерения в последней формуле знак «-» заменим на знак «+»:

$$\Delta Y = \Delta a + \Delta b + \Delta c. \quad (3.2)$$

Относительная погрешность косвенного измерения в этом случае определяется по формуле

$$\delta_Y = \frac{\Delta Y}{Y} 100 \%. \quad (3.3)$$

Величина предельной погрешности, рассчитанная по формулам (3.2), (3.3), обычно оказывается завышенной, поскольку погрешности $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ могут иметь разные знаки. Поэтому чаще применяют среднеквадратические оценки погрешности косвенного измерения. Для получения среднеквадратической оценки погрешности в формуле для предельной оценки погрешности сумму заменяют корнем квадратным из суммы квадратов:

$$\Delta Y_{\text{ск}} = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta c)^2}, \quad (3.4)$$

$$\delta_{Y_{\text{ск}}} = \frac{\Delta Y_{\text{ск}}}{Y} = \frac{\sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta c)^2}}{a + b - c}. \quad (3.5)$$

2. Искомая величина Y связана с величинами a, b, c зависимостью вида умножение-деление, например; $Y = a \cdot b \cdot c$; $Y = a \cdot b / c$; $Y = a / (b \cdot c)$. В

подобных случаях предел относительной погрешности измерения величины Y в относительных единицах равен

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}. \quad (3.6)$$

Если предельную относительную погрешность измерения величины Y выразить в процентах, то выражение (3.6) примет вид

$$\delta_Y = \delta_a + \delta_b + \delta_c, \quad (3.7)$$

где $\delta_Y, \delta_a, \delta_b, \delta_c$ – выраженные в % относительные погрешности измерения величин Y, a, b, c .

Предельную оценку абсолютной погрешности косвенного измерения находим по формуле

$$\Delta Y = \frac{Y \cdot \delta_Y}{100}. \quad (3.8)$$

Чаще используются среднеквадратические оценки погрешностей по формулам

$$\frac{\Delta Y_{\text{ск}}}{Y} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2}; \quad (3.9)$$

$$\delta_{Y_{\text{ск}}} = \sqrt{\delta_a^2 + \delta_b^2 + \delta_c^2}; \quad (3.10)$$

$$\Delta Y_{\text{ск}} = Y \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2}, \quad (3.11)$$

где $\Delta Y_{\text{ск}}/Y, \delta_{Y_{\text{ск}}}$ – среднеквадратические оценки относительной погрешности соответственно в относительных единицах и процентах;

$\Delta Y_{\text{ск}}$ – среднеквадратическая оценка абсолютной погрешности.

Задачи

1. Мощность электрического нагревателя измеряется методом амперметра и вольтметра. Амперметр показывает 8 А, вольтметр – 225 В. Определить относительную погрешность измерения мощности, если известно; вольтметр и амперметр имеют класс точности 1,0;

предел измерения амперметра 10 А; предел измерения вольтметра 250 В. Найти абсолютную и относительную погрешности измерения мощности, записать результат измерения мощности.

2. Мощность нагревателя измеряется методом амперметра и вольтметра. Амперметр показывает 3 А, вольтметр – 225 В. Определить относительную погрешность измерения мощности, если известно: вольтметр и амперметр имеют класс точности 1,0; предел измерения амперметра 10 А; предел измерения вольтметра 250 В. Записать результат измерения мощности.

3. Размеры детали в форме прямоугольного параллелепипеда равны: $l_1 = 302$ мм; $l_2 = 156$ мм; $l_3 = 100$ мм. Все размеры измерены с погрешностью не более 0,1 мм. Определить объем детали. Найти абсолютную и относительную погрешности измерения объема детали. Записать результат измерения объема детали в дм^3 .

4. Силу тока в электрической цепи определяют с помощью шунта 75ШИП1-30-0,5 с номинальным сопротивлением 2500 мкОм и классом точности 0,5. Падение напряжения на шунте измеряется цифровым вольтметром класса точности 0,2/0,05 на пределе 0,2 В. Записать результат измерения силы тока, если вольтметр показывает 52 мВ.

5. Определить периметр прямоугольной комнаты размером 6,34 x 3,56 м. Размеры комнаты измерены с погрешностью ± 2 см. Найти абсолютную и относительную погрешности измерения периметра. Записать результат измерения периметра комнаты.

Контрольные вопросы

1. Какие измерения называются косвенными?
2. Как определить погрешность косвенного измерения при произвольном виде функции $Y = F(a, b, c)$?
3. Как определить погрешность косвенного измерения при $Y = a + b - c$?
4. Как определить погрешность косвенного измерения при $Y = a \cdot b \cdot c$; $Y = a \cdot b / c$; $Y = a / (b \cdot c)$?

Занятие № 4

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель занятия: получить навыки обработки результатов прямых многократных измерений.

Последовательность обработки результатов многократных измерений

Многократное измерение – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом однократных измерений. Многократное измерение состоит из ряда однократных измерений, выполненных в одинаковых условиях (тем же средством измерений, на том же пределе, одним оператором, при неизменных внешних условиях и т. д.).

В результате статистической обработки результатов многократных измерений удастся уменьшить влияние случайной составляющей погрешности. За *результат измерения* принимают среднее арифметическое результатов измерений, в которые предварительно введены поправки для исключения систематических погрешностей.

Обработка результатов ряда измерений выполняется в следующей последовательности:

1. Выявляют и исключают грубые погрешности (промахи), если таковые имеются. Исключают известную систематическую погрешность из результатов измерений. В данном задании считаем, что систематическая погрешность отсутствует.

Грубой погрешностью (промахом) называется погрешность, существенно превышающая значение ожидаемой погрешности при данных условиях проведения измерительного эксперимента. Обычно грубая погрешность является следствием значительного внезапного изменения условий эксперимента: скачка напряжения электропитания; не учтённое экспериментатором изменение температуры окружающей среды (при длительном эксперименте); неправильный отсчёт показаний из-за отвлечения внимания экспериментатора и др. Наличие грубых погрешностей в выборке результатов измерений может сильно исказить среднее значение выборки и как следствие доверительный интервал. Поэтому выявление и исключение результатов, содержащих промах, обязательно.

Обычно результат, содержащий грубую погрешность, сразу виден в ряду измеренных значений, но в каждом конкретном случае это необходимо доказать. Одним из критериев для оценки промаха является критерий Романовского:

$$\beta = \frac{|\bar{x} - x_k|}{S}, \quad (4.1)$$

где \bar{x} – среднее арифметическое значение исправленного ряда измерений;

x_k – результат измерений, подозрительный на содержание грубой погрешности;

S – средняя квадратическая погрешность измерений (стандартное отклонение).

Среднее арифметическое значение исправленного ряда измерений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.2)$$

где x_i – i -й исправленный результат измерения;

n – число измерений.

При расчете \bar{x} из ряда результатов измерений предварительно исключают подозрительный результат x_k .

Средняя квадратическая погрешность измерений (стандартное отклонение)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (4.3)$$

При расчете S не используют подозрительный результат x_k . Значение S характеризует степень рассеяния единичных результатов ряда измерений x_i около среднего их значения. Чем больше S , тем значительнее возможное отклонение значений x_i от \bar{x} . Средняя квадратическая погрешность S является основной характеристикой величины случайных погрешностей результатов измерений.

В зависимости от выбранной доверительной вероятности P и числа измерений n из таблицы 4.1 находят теоретический уровень значимости β_T и сравнивают с ним рассчитанное значение β . Если $\beta > \beta_T$, то результат x_k следует отбросить как содержащий грубую погрешность. Если $\beta < \beta_T$, то выборку следует сохранить в полном объёме.

Как правило, критерий Романовского применяют при объёме выборки $n < 20$.

Таблица 4.1 – Значения теоретического уровня значимости β_T

n	P		
	0,90	0,95	0,99
3	1,412	1,414	1,414
5	1,869	1,917	1,972
7	2,093	2,182	2,310
9	2,238	2,349	2,532
11	2,343	2,470	2,689
13	2,426	2,563	2,809
15	2,523	2,670	2,946
17	2,551	2,701	2,983
19	2,601	2,754	3,049

2. Вычисляют среднюю квадратическую погрешность среднего арифметического

$$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \quad (4.4)$$

Поясним смысл средней квадратической погрешности среднего арифметического $S_{\bar{X}}$. Поскольку число измерений n , на основании которых вычислено среднее арифметическое \bar{x} , ограничено, то, повторив заново серию измерений этой же величины, мы получили бы новое значение \bar{x} . Повторив многократно серии измерений и, вычисляя для каждой серии \bar{x} , принимаемое за результат измерения, мы убедимся в рассеянии средних арифметических значений \bar{x} . Значение $S_{\bar{X}}$ является оценкой случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений.

Из формулы (4.4) следует, что доверительный интервал среднего арифметического в \sqrt{n} раз уже доверительного интервала единичных результатов измерений.

3. Вычисляют доверительные границы случайной составляющей погрешности результата измерения для доверительной вероятности $P_d = 0,95$.

При нахождении границ доверительного интервала случайной погрешности измерений считаем, что распределение результатов измерений подчиняется нормальному закону.

В этом случае доверительные границы случайной погрешности измерений находят с помощью квантилей распределения (коэффициентов) Стьюдента по формулам

$$x_H = \bar{x} - t \cdot S_{\bar{X}}; \quad (4.3)$$

$$x_B = \bar{x} + t \cdot S_{\bar{X}}, \quad (4.4)$$

где x_H и x_B – соответственно координаты нижней и верхней границ доверительного интервала;

t – квантиль распределения Стьюдента (таблица 4.2).

Если на результат измерений оказывает влияние только случайная составляющая погрешности, то этот результат представляют в виде: $\bar{x}; x_H; x_B; P_d$.

4. Находят доверительные границы погрешности результата измерения. В нашем случае, когда систематическая погрешность отсутствует, эти границы будут совпадать с найденными в предыдущем пункте доверительными границами случайной погрешности измерений.

5. Записывают результат измерения в форме: $\bar{x} \pm t \cdot S_{\bar{X}}, P_d = \dots$

Таблица 4.2 – Квантили распределения Стьюдента

Число измерений, n	Доверительная вероятность P_d				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,68	636,62
3	2,92	4,30	6,97	9,93	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,92
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,37	4,06	6,87

Число измерений, n	Доверительная вероятность P_d				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
∞	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

Задание

При многократном измерении физической величины x получен ряд измеренных значений (таблица 4.3). Провести обработку результатов измерений по описанной выше методике. Записать результат измерения величины x .

Таблица 4.3

№ вар.	x	Результаты измерений	P
1	$U, В$	4,25; 4,21; 4,23; 4,21; 4,25; 4,23; 4,26; 4,22; 4,21; 4,23; 4,86; 4,21; 4,25; 4,24; 4,26; 4,22	0,90
2	$R, кОм$	7,36; 7,32; 7,34; 7,32; 7,36; 7,97; 7,34; 7,37; 7,33; 7,32; 7,34; 7,32; 7,36; 7,38; 7,37; 7,33	0,95
3	$I, А$	85,6; 85,7; 85,9; 85,6; 85,7; 85,8; 84,12; 85,6; 85,9; 85,9; 85,7; 85,8; 85,7; 85,8; 85,9; 85,6	0,99
4	$\varphi, \%$	58; 57; 59; 58; 57; 58; 64; 56; 59; 59; 58; 58; 57; 58; 59; 58	0,90
5	$F, Н$	403; 408; 410; 405; 406; 398; 496; 404; 410; 353; 406; 398; 496; 404; 410; 405; 406; 398	0,95
6	$P, кг/м^3$	93,08; 93,65; 93,26; 93,01; 92,35; 92,65; 92,43; 92,89; 93,87; 93,15; 93,44; 97,63; 92,99; 93,34	0,99
7	$Q, Дж$	20,4; 20,2; 20,0; 20,5; 19,7; 20,3; 20,3; 20,4; 25,4; 20,1; 203; 20,0; 20,5; 17,7; 20,1	0,90
8	$B, Тл$	64,0; 64,2; 62,3; 64,4; 65,0; 64,5; 64,9; 63,7; 64,8; 64; 64,3; 64,3; 64,4; 67,0; 64,5	0,95

№ вар.	x	Результаты измерений	P
9	P , Па	1503; 1508; 1505; 1503; 1510; 1505; 1507; 1478; 1503; 1503; 1508; 1505; 1499; 1510; 1505; 1507; 1598	0,99
10	V , м ³	50,3; 50,1; 50,3; 50,0; 50,6; 49,7; 50,3; 50,4; 50,1; 50,3; 50,1; 50,3; 50,0; 50,6; 42,7; 50,3; 50,0; 50,6	0,90
11	t , с	116; 117; 116; 115; 117; 101; 116; 115; 117; 115; 112; 117; 116; 115; 117; 116; 116; 114; 117	0,95
12	L , Гн	747; 764; 766; 765; 763; 765; 763; 765; 764; 764; 766; 765; 763; 765; 763; 765; 763; 785; 764	0,99
13	m , кг	0,70; 0,74; 0,38; 0,69; 0,72; 0,68; 0,68; 0,70; 0,71; 0,53; 0,74; 0,70; 0,69; 0,72; 0,68; 0,69; 0,72; 0,68; 0,68	0,90
14	P , Вт	40,4; 41,0; 40,3; 40,0; 45,5; 42,7; 40,3; 40,4; 40,8; 40,4; 41,0; 40,3; 40,0; 33,5; 42,7; 40,4	0,95
15	f , Гц	780,3; 780,0; 788,8; 780,5; 780,3; 780,0; 780,3; 780,9; 780,3; 780,4; 780,3; 780,0; 780,3; 790,9; 780,3; 780,4; 780,0	0,99
16	S , м ²	4604; 4608; 4605; 4604; 4610; 4605; 4607; 4578; 4604; 4604; 4608; 4605; 4597; 4610; 4605; 4607; 4698	0,90
17	Q , м ³ /с	744; 764; 766; 765; 763; 765; 763; 765; 764; 764; 766; 751; 763; 765; 763; 765	0,95
18	J , Кд	354; 354; 396; 355; 353; 355; 353; 355; 354; 354; 356; 321; 353; 355; 353; 355	0,99
19	T , °С	15,6; 15,7; 15,9; 15,6; 15,7; 15,8; 14,1; 15,6; 15,9; 15,9; 15,7; 17,8; 15,7; 15,8; 15,9; 15,6	0,90
20	V , м/с	80,6; 80,7; 80,9; 80,6; 80,7; 80,8; 84,1; 80,6; 80,9; 80,9; 80,7; 80,8; 89,7; 80,9; 80,6	0,95
21	φ , рад	49; 45; 45; 46; 47; 47; 45; 47; 46; 47; 45; 45; 46; 46; 46; 42; 45; 46; 46	0,99
22	l , м	0,30; 0,32; 0,30; 0,21; 0,32; 0,28; 0,29; 0,3; 0,33; 0,3; 0,34; 0,30; 0,29; 0,32; 0,28; 0,29; 0,30; 0,43	0,90
23	F , Н	116; 118; 115; 116; 115; 101; 116; 114; 117; 116; 112; 115; 138; 115; 116; 117; 111	0,95
24	R , Ом	3258; 3259; 3563; 3258; 3259; 3257; 3256; 3254; 3257; 3258; 3259; 3263; 3258; 3259; 3257; 3456; 3254; 3257	0,99
25	M , Н·м	0,28; 0,15; 0,14; 0,09; 0,12; 0,15; 0,13; 0,14; 0,14; 0,13; 0,15; 0,14; 0,14; 0,13; 0,13; 0,14; 0,15; 0,14	0,90

Контрольные вопросы

1. В каких случаях проводят многократные измерения? Что принимают за результат таких измерений?

2. Дайте определение следующих понятий: доверительная вероятность, доверительная граница случайной погрешности измерения, промах.

3. Что такое доверительный интервал?

4. Назовите основные числовые характеристики ряда наблюдений.

5. Чем отличается дисперсия ряда наблюдений от дисперсии результата измерений?

6. Какие критерии согласия вы знаете? Для чего они служат?

7. Как представить результаты измерений с многократными наблюдениями?

Занятие № 5

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Цель занятия: изучить измеряемые параметры электрического напряжения и тока, методические погрешности, которые могут возникать при измерении данных параметров.

Параметры переменных периодических сигналов

Измерения напряжения и силы тока – наиболее распространенные виды измерений. Постоянное напряжение характеризуется значением и полярностью, ток – силой тока и направлением. Для характеристики переменного напряжения (тока) используется несколько параметров.

Обычно приходится сталкиваться с измерением параметров периодически изменяющегося напряжения (тока), форма которого может быть произвольной. Например, синусоидальное напряжение описывается выражением

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения в каждый момент времени; U_m – амплитуда, ω – круговая частота; φ – начальная фаза.

Периодические сигналы (напряжение и ток) характеризуются одними и теми же параметрами, которые далее для определенности будут рассматриваться на примере напряжения.

Амплитудное значение U_m – наибольшее мгновенное значение напряжения $u(t)$ за период T . Для негармонических сигналов используется пиковое значение (максимальное значение из всех мгновенных значений) в положительных или отрицательных полуволнах.

Среднее значение определяется как среднеарифметическое всех мгновенных значений за период T

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Среднее значение является постоянной составляющей переменного напряжения. Для переменного напряжения, форма которого симметрична относительно оси времени (например, синусоидального) среднее значение напряжения равно нулю.

Средневыпрямленное значение – среднеарифметическое модулей всех мгновенных значений за период

$$U_{\text{св}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt.$$

Для синусоидального напряжения средневыпрямленное значение равно среднеарифметическому за положительный полупериод.

Среднеквадратическое (эффективное, действующее) значение

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (5.1)$$

Все вольтметры переменного тока, за исключением импульсных, градуируются в среднеквадратических значениях напряжения. В зарубежной терминологии для среднеквадратического значения применяется аббревиатура RMS.

Для характеристики формы периодических сигналов введены два параметра: коэффициент амплитуды $K_a = U_m/U$ и коэффициент формы $K_f = U/U_{\text{св}}$ (таблица 5.1).

Для периодических сигналов любой формы связь между амплитудным и среднеквадратическим значением определяется формулой

$$U_m = U K_a,$$

где K_a – коэффициент амплитуды.

Средневыпрямленное и среднее квадратическое значения связаны между собой коэффициентом формы K_ϕ

$$U = U_{св} K_\phi.$$

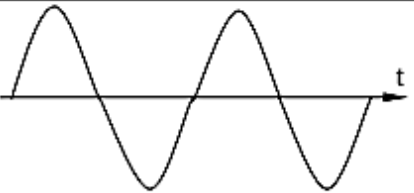

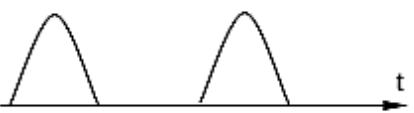


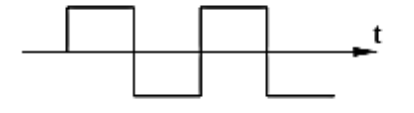
Коэффициенты формы и амплитуды однополярных импульсов определяются их скважностью

$$Q = T/\tau; \quad K_a = K_\phi = \sqrt{Q},$$

где τ – длительность импульса.

Следовательно, зная одно из значений напряжения и коэффициенты K_a , K_ϕ , можно определить другие значения напряжения. Значения коэффициентов удовлетворяют неравенству: $1 \leq K_\phi \leq K_a$. Знак равенства выполняется для напряжения постоянного тока и напряжения формы «меандр». Значения коэффициентов K_a , K_ϕ для различных наиболее употребляемых сигналов представлены в таблице 5.2.

Таблица. 5.2

Форма сигнала	График	Коэффициент	
		K_a	K_ϕ
Синусоидальная		1,41	1,1
Пульсирующая (двухполупериодный выпрямитель)		1,41	1,11
Пульсирующая (однополупериодный выпрямитель)		2	1,57
Пилообразная		1,73	1,16
Треугольная (симметричная)		1,73	1,16
Прямоугольная (меандр)		1	1

Погрешности измерения тока и напряжения

При измерении напряжений и токов могут возникать методические и инструментальные погрешности. Оценка инструментальных погрешностей средств измерения рассматривалась ранее. Далее будут описаны методические погрешности, обусловленные влиянием прибора на контролируруемую цепь и влиянием формы сигнала на результат измерения.

Влияние прибора на контролируруемую электрическую цепь проявляется в перераспределении сигналов (токов и напряжений) вследствие включения в цепь дополнительной нагрузки, равной внутреннему сопротивлению прибора. Величина методической погрешности зависит от степени искажения процессов, протекающих в схеме, и определяется соотношением сопротивлений прибора и измеряемой цепи.

Перераспределение напряжений в контролируемой цепи при подключении вольтметра поясняет рисунок 5.1. Источник измеряемого сигнала E имеет внутреннее сопротивление $R1$. Для измерения сигнала E к источнику подключаем вольтметр, который на схеме показан как резистор $R2$ (входное сопротивление вольтметра). Показания вольтметра будут равны величине напряжения U_2 , действующего на его входе, то есть падению напряжения на сопротивлении $R2$.

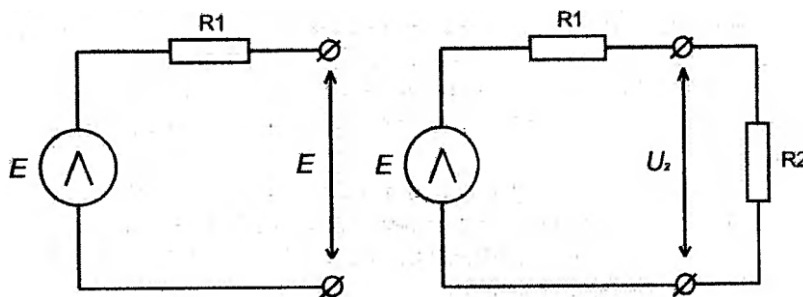


Рисунок 5.1

При подключении вольтметра напряжение на выходе источника изменилось (до подключения вольтметра было E , после подключения стало U_2). Так как $U_2 = E R2/(R1+R2) < E$, то измеренное значение напряжения отличается от истинного значения измеряемой величины E . Поделив в последнем равенстве числитель и знаменатель дроби на $R2$, получим $U_2 = E/(1+R1/R2)$. Отсюда следует, что чем больше $R2$ в

сравнении с $R1$, тем результат измерения ближе к истинному значению измеряемой величины E .

Методические погрешности, обусловленные второй причиной, возникают при измерении негармонических сигналов и могут быть вызваны либо недостаточной шириной полосы рабочих частот прибора, либо особенностями его градуировки. Метрологические характеристики вольтметров переменного тока нормируются для синусоидального напряжения с учетом определенного диапазона частот. Недостаточность полосы частот прибора проявляется при анализе сигнала, имеющего широкий спектр гармоник. Например, при измерении коротких импульсных сигналов, погрешность будет возникать, если верхняя частота спектра сигнала окажется больше верхней частоты рабочего диапазона прибора. Исключить или уменьшить такую погрешность можно, выбрав измерительный прибор с соответствующей полосой рабочих частот.

Погрешность, обусловленная особенностью градуировки, связана с тем, что в зависимости от принципа действия, приборы реагируют на разные значения переменного сигнала [3]. Приборы электромагнитной, электродинамической и тепловой систем реагируют на действующее значение, магнитоэлектрические приборы с выпрямителем – на средневыпрямленное значение, магнитоэлектрические без выпрямителя – на постоянную составляющую, амплитудные электронные вольтметры – на максимальное (пиковое) значение сигнала. При этом практически все эти приборы, за небольшим исключением, градуируются на синусоидальном сигнале и показывают его среднеквадратичное значение.

Для приборов, реагирующих на действующее (среднеквадратичное) значение напряжения, проблемы не возникает – показания прибора равны действующему значению сигнала независимо от его формы. Проблема возникает, когда прибор реагирует на амплитудное или средневыпрямленное значения, а его шкала проградуирована в действующих значениях гармонического сигнала.

Для примера возьмем вольтметр, который измеряет амплитуду U_m несинусоидального сигнала, но его шкала проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения. В этом случае показания прибора определяются соотношением: $U = U_m / 1,41$, где 1,41 – коэффициент амплитуды гармонического сигнала, K_a . При измерении гармонического сигнала методическая погрешность не воз-

никает и показания прибора будут равны действующему значению. Негармонические сигналы будут иметь $K_a \neq 1,41$, но прибор при определении действующего значения напряжения все равно будет использовать $K_a = 1,41$. В результате возникает методическая погрешность. Допустим, что измеряется пилообразный сигнал с амплитудой 173 В ($K_a = 1,73$). Действующее значение такого сигнала равно $173/1,73 = 100$ В, но прибор покажет $173/1,41 = 122,7$ В. Следовательно, методическая погрешность в этом случае составит $122,7 - 100 = 22,7$ В.

Аналогичная погрешность возникает и для приборов, реагирующих на средневыпрямленное значение сигнала, если градуировка его шкалы была произведена в действующих значениях гармонического сигнала. В этом случае показания прибора определяются соотношением: $U = U_{св} K_{\phi} = U_{св} 1,11$, где 1,11 – коэффициент формы гармонического сигнала. Например, для пилообразного сигнала ($K_{\phi} = 1,16$) с действующим значением 100 В, средневыпрямленное значение будет равно: $U_{св} = 100/1,16 = 86,2$ В. При подаче такого сигнала на вольтметр он будет показывать $U_{п} = 86,2 \cdot 1,11 = 95,7$ В. Методическая погрешность составит $95,7 - 100 = -4,3$ В.

Таким образом, прямые (без введения поправок), измерения действующего значения негармонического сигнала возможны только приборами с детекторами среднеквадратического (действующего) значения. Использование приборов с другими типами детекторов может привести к появлению больших методических погрешностей.

Существуют приборы, которые могут измерять действующее значение сигнала любой формы, например, электростатические и термоэлектрические, однако, они имеют малое применение из-за ограниченного частотного диапазона (до 10 МГц) и низкой чувствительности. Измерителями действующего значения являются также электронные вольтметры с преобразователями (детекторами) действующего значения. В последнее время появились цифровые приборы, которые позволяют определять действующее значение сигнала путем его прямого вычисления по формуле (5.1).

Пример решения задачи

Определить показания вольтметров с различными типами детекторов при измерении пилообразного напряжения (рисунок 5.2).

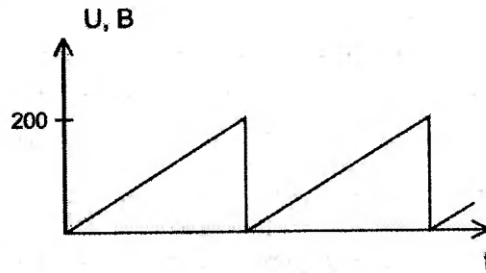


Рисунок 5.2

Решение

Находим истинные параметры самого сигнала:

- действующее значение сигнала $U = U_m / K_a = 200 / 1,73 = 115,6 \text{ В}$;
- среднев्यпрямленное значение $U_{св} = U / K_\phi = 115,6 / 1,16 = 99,6 \text{ В}$.

Определяем показания вольтметров:

- прибор с детектором среднеквадратического (действующего) значения правильно покажет действующее значение измеряемого сигнала независимо от его формы, то есть $115,6 \text{ В}$;

- показания прибора с детектором среднев्यпрямленного значения, градуированного на синусоидальном сигнале в действующих значениях будут равны: $1,11 \cdot U_{св} = 1,11 \cdot 99,6 = 110,5 \text{ В}$; методическая погрешность составит $110,5 - 115,6 = -5,1 \text{ В}$;

- показания прибора с амплитудным детектором, также градуированного в действующих значениях синусоиды, пропорциональны амплитуде сигнала: $U_m / 1,41 = 200 / 1,41 = 141,8 \text{ В}$; методическая погрешность составит $141,8 - 110,5 = 31,3 \text{ В}$.

Задачи

1. Чему равна методическая погрешность измерения тока в цепи, сопротивление которой 200 Ом ? Внутреннее сопротивление миллиамперметра 20 Ом . Каким должно быть сопротивление прибора, чтобы уменьшить эту погрешность в 2 раза?

2. Делитель напряжения образован резисторами 100 кОм и 10 кОм . При подключении к выходу делителя вольтметра выходное напряжение изменилось на 5% . Чему равно внутреннее сопротивление вольтметра? Каким оно должно быть, чтобы изменение выходного сигнала не превышало $0,5 \%$? Нарисовать схему измерения.

3. Напряжение на выходе источника сигнала $1,1 \text{ В}$, внутреннее сопротивление источника 100 Ом . Подключение вольтметра не долж-

но изменять выходной сигнал больше, чем на 1%. Каким должно быть входное сопротивление вольтметра?

4. Напряжение на участке цепи равно 32 В. Для его измерения выбран стрелочный вольтметр класса точности 2,5 с пределом 60 В. Каким должно быть входное сопротивление вольтметра, чтобы погрешность за счет влияния его на измеряемую цепь совпадала по величине с инструментальной погрешностью? Эквивалентное выходное сопротивление участка цепи равно 20 кОм.

5. Чему будут равны показания электронного прибора с преобразователем средневыпрямленного значения, отградуированного в действующих значениях синусоиды, если на него поочередно подать два сигнала: гармонический сигнал и меандр? Амплитуды обоих сигналов одинаковы – 100 В.

6. Что покажет прибор с амплитудным преобразователем, градуированный в действующих значениях гармонического сигнала при измерении сигнала меандр.

Занятие № 6

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель занятия: изучить принцип действия и характеристики термопреобразователей сопротивления, термисторов и термоэлектрических преобразователей.

Термопреобразователи сопротивления

Принцип действия термопреобразователей сопротивления (ТС) основан на зависимости электрического сопротивления металлов от температуры. Чувствительный элемент ТС представляет собой резистор из металлической проволоки или пленки с выводами для крепления соединительных проводов, имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Чувствительные элементы ТС изготавливают из платины, меди или никеля.

Диапазоны измеряемых температур термопреобразователей сопротивления [3]:

платиновые

от – 200 до +850 °С;

медные от – 180 до +200°С;
 никелевые от – 60 до + 180 °С.

Номинальная статическая характеристика (НСХ) ТС описывает зависимость сопротивления ТС от температуры и может быть представлена в аналитическом, табличном или графическом виде.

Температурный коэффициент ТС определяется по формуле

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

где R_{100} , R_0 – значения сопротивления ТС по номинальной статической характеристике соответственно при 100 °С и 0 °С.

Номинальные значения сопротивлений R_0 выбираются из ряда: 10; 50; 100; 500; 1000 Ом. Наиболее распространены ТС с $R_0 = 100$ Ом. Чувствительность термопреобразователей и линейность их характеристик иллюстрирует рисунок 6.1.

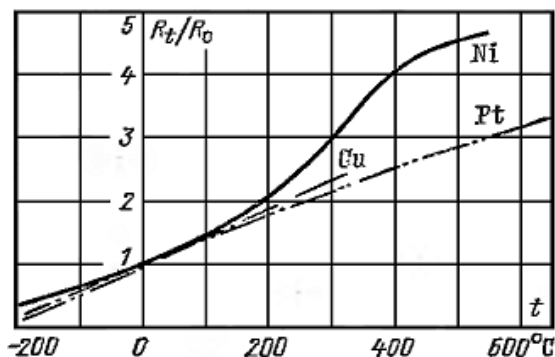


Рисунок 6.1 – Зависимости отношения R_t/R_0 от температуры для платины, меди и никеля

Номинальные статические характеристики ТС нормирует ГОСТ 6651-2009. В качестве примера ниже приведены формулы некоторых номинальных статических характеристик.

Платиновые ТС, $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$:

для диапазона измерений от минус 200 °С до 0 °С

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100 \text{ } ^\circ\text{C})t^3]; \quad (6.1)$$

для диапазона измерений от 0 °С до 850 °С

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (6.2)$$

где R_t – сопротивление ТС, Ом, при температуре t , °C;
 R_0 – номинальное сопротивление ТС, Ом, при температуре 0 °C;
 $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$; $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$.
 Медные ТС, $\alpha = 0,00428 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

для диапазона измерений от минус 180 °C до 0 °C

$$R_t = R_0[1 + At + Bt(t + 6,7 \text{ } ^\circ\text{C}) + Ct^3]; \quad (6.3)$$

для диапазона измерений от 0 °C до 200 °C

$$R_t = R_0[1 + At], \quad (6.4)$$

где $A = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $B = -6,2032 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$; $C = 8,5154 \cdot 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$.

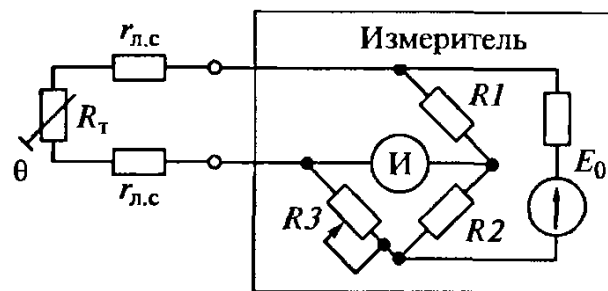


Рисунок 6.2 – Двухпроводное включение ТС в мостовую схему

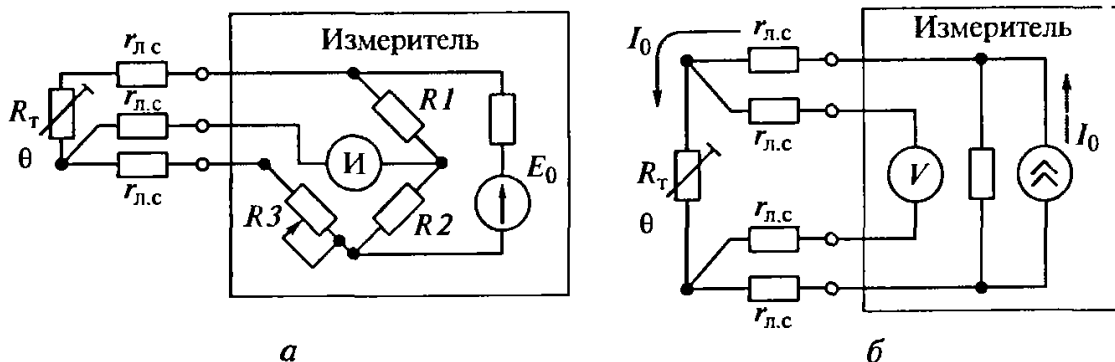


Рисунок 6.3 – Трехпроводная (а) и четырехпроводная (б) схемы включения ТС

Термопреобразователи часто используют совместно с вторичными приборами, в основе которых лежит мостовая схема (мост Уитстона). Принцип работы мостовой схемы иллюстрирует рисунок 6.2. Здесь удаленный термопреобразователь R_t подключен к мостовой схеме с помощью двух проводов с сопротивлением $r_{л.с}$. Мостовая

схема имеет диагональ питания, соединенную с источником напряжения E_0 , и измерительную диагональ, к которой подключен индикатор И. Резисторы R_1, R_3 или R_T, R_2 образуют противоположные плечи моста, плечи R_1, R_T или R_2, R_3 называются смежными. При выполнении условия $R_T \cdot R_2 = R_1 \cdot R_3$ мост находится в равновесии и показания индикатора И будут равны нулю ($U_{\text{вых.}} = 0$).

Различают неуравновешенные и уравновешенные мосты. В неуравновешенном мосте при изменении сопротивления R_T на измерительной диагонали появляется напряжение $U_{\text{вых.}}$, пропорциональное приращению ΔR_T . В неуравновешенных мостах приемлемая нелинейность характеристики преобразования $U_{\text{вых.}} = f(\Delta R_T)$ возможна лишь при малых приращениях ΔR_T . Термопреобразователи сопротивления это условие не обеспечивают, поэтому их целесообразно использовать в схеме уравновешенного моста. Широкое распространение получили автоматические мосты со следящим уравновешиванием. У этих мостов R_3 выполнен в виде специального высокоточного регулируемого резистора (реохорда). Следящая система постоянно поддерживает равновесное состояние моста, устанавливая движок реохорда в такое положение, при котором на выходе моста будет нулевое напряжение. При этом обеспечивается условие $R_T = R_3$ и значение измеряемой температуры определяется по положению движка реохорда. В более поздних цифровых автоматических мостах для балансировки используются наборы переключаемых резисторов.

Рассмотрим влияние сопротивлений проводов линии связи ТС с вторичным прибором на результат измерения. При двухпроводной схеме подключения ТС (рисунок 6.2) при равновесном состоянии моста соблюдается условие

$$(R_T + 2r_{\text{л.с.}}) R_2 = R_1 R_3.$$

Отсюда

$$R_T = \frac{R_1 R_3}{R_2} - 2r_{\text{л.с.}}$$

То есть результат определения R_T будет зависеть от сопротивлений проводов линии связи $r_{\text{л.с.}}$. При настройке измерительного устройства проводят начальное уравновешивание моста, что компенсирует влияние сопротивлений $r_{\text{л.с.}}$. Однако температурное изменение сопротивлений проводов ничем не компенсируется и вызывает до-

полнительную погрешность. В связи с этим двухпроводное подключение ТС может быть использовано только в следующих случаях:

- $r_{л.с} \ll R_T$, поэтому температурная погрешность пренебрежимо мала;

- температура соединительных проводов не изменяется в процессе эксплуатации.

Основным вариантом включения ТС является трехпроводная схема (рисунок 6.3, а). Здесь сопротивления проводов $r_{л.с}$ оказываются включенными в соседние плечи моста и уравнивают друг друга:

$$(R_T + r_{л.с}) R_2 = R_1 (R_3 + r_{л.с}).$$

То есть в трехпроводной схеме при равновесии моста результат измерения будет определяться только температурой ТС и не будет зависеть от сопротивлений $r_{л.с}$. Для устранения влияния сопротивления $r_{л.с}$ в измерительной диагонали прибор И должен иметь высокое входное сопротивление. Это условие легко выполняется, поскольку в качестве И обычно выступает измерительный усилитель или аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с высоким входным сопротивлением.

Приборы со следящим уравниванием до недавнего времени повсеместно применялись в промышленности, однако в настоящее время они заменяются более компактными и быстродействующими микропроцессорными устройствами. В современных устройствах реализованы не мостовые трехпроводные схемы измерения сопротивлений на основе источников тока.

Находит применение также четырехпроводная схема включения ТС (рисунок 6.3, б). Для питания ТС здесь используется источник постоянного тока I_0 . Значение I_0 не зависит от сопротивления соединительных проводников $r_{л.с}$. С помощью отдельной пары проводов вольтметр с высоким входным сопротивлением измеряет падение напряжения непосредственно на сопротивлении R_T .

При применении ТС следует учитывать нагрев чувствительного элемента преобразователя измерительным током. Вследствие этого измеренная температура будет выше истинного значения на величину перегрева чувствительного элемента ТС относительно температуры контролируемой среды. Для снижения вызванной этим методической погрешности до пренебрежимо малых значений измерительный ток

не должен превышать 1 мА для ТС с $R_0 = 100$ Ом и 0,1 мА для ТС с $R_0 = 500$ Ом. Чрезмерное уменьшение измерительного тока тоже нежелательно, поскольку приводит к пропорциональному снижению чувствительности преобразователя.

Термисторы

Термисторы (полупроводниковые терморезисторы) обладают отрицательным температурным коэффициентом сопротивления 2...7 %/К, что значительно больше, чем у ТС.

Сопротивление термистора при увеличении температуры от T_0 до T снижается по экспоненциальному закону:

$$R_T = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right),$$

где R_0 – сопротивление термистора при температуре T_0 ;

R_T – сопротивление термистора при температуре T ;

B – коэффициент температурной чувствительности, К;

T_0 и T – начальное и конечное значения температуры, К.



Рисунок 6.4 – Внешний вид различных видов термисторов

Преимущества термисторов: малые габариты и масса (малая тепловая инерционность), высокая надежность и механическая прочность, низкая цена.

Недостатки термисторов:

- сравнительно узкий диапазон измеряемых температур (типично от -50 до $+150^\circ\text{C}$);

- значительная нелинейность характеристики преобразования;

- плохая повторяемость характеристики преобразования от экземпляра к экземпляру, что означает необходимость индивидуальной градуировки и затрудняет замену датчиков даже одного типа;

- значительная временная нестабильность характеристики, особенно при длительной работе на высоких температурах.

Вследствие нелинейной характеристики термисторы обычно применяются в узком диапазоне температур (тепловая защита, системы стабилизации заданной температуры).

Термоэлектрические преобразователи

В термоэлектрических преобразователях в качестве чувствительных элементов используются термопары. Характеристики некоторых типов ТП приведены в таблице 6.1. Тип термоэлектрического преобразователя определяется типом установленной в нем термопары. Термопара состоит из двух проводников (термоэлектродов) из разных металлов электрически соединенных в зоне рабочего спая. Диаметр термоэлектродов у термопар из благородных металлов составляет 0,07...0,5 мм, из неблагородных металлов – 0,1...3,2 мм. Характеристики термоэлектрических преобразователей регламентируют ГОСТ Р 50342-92, ГОСТ 8.585-2001 [4].

Если рабочий спай и свободные концы термопары имеют разные температуры, то термопара генерирует термоэлектродвижущую силу (ТЭДС). Величина ТЭДС нелинейно зависит от разности температур рабочего спая и свободных концов. В стандартах номинальные статические характеристики термопар приведены для температуры свободных концов 0 °С. В современных измерительных устройствах выполняется автоматическая линеаризация характеристик преобразования ТП и автоматическая компенсация влияния температуры свободных концов.

При невысоких требованиях к точности у некоторых типов термопар (например, ТХА) номинальную статическую характеристику можно считать линейной:

$$E_T = S_T(\theta_1 - \theta_2),$$

где E_T – ТЭДС термопары; S_T – коэффициент преобразования; θ_1 – температура рабочего спая; θ_2 – температура свободных концов.

Термопара может иметь изолированный или неизолированный рабочий спай. В последнем случае спай электрически соединен с защитной арматурой термопары, то есть сопротивление изоляции у такой термопары будет равно нулю.

Измерители на основе ТП отличаются высокой точностью, хоро-

шей повторяемостью характеристики преобразования, малой инерционностью.

Таблица 6.1 – Характеристики некоторых типов ТП

Тип ТП	Материал термопары	Диапазон измерения (кратковременно), °С	Коэффициент преобразования, мкВ/°С при 20 °С
Е	Хромель – константан	– 270...+1000	62
J	Железо – константан	– 210...+1000 (1200)	51
К (ТХА)	Хромель – алюмель	– 200...+1000 (1372)	40
L (ТХК)	Хромель – копель	– 300...+600 (800)	64
R (ТПП)	Платина – платинородий (13 % родия)	– 40... + 1500 (1750)	7
S (ТПП)	Платина – платинородий (10% родия)	– 40...+1600 (1768)	7
T (ТМК)	Медь – константан	– 270...+400	40
ТВР	вольфрам-рений	1000...2500	–

Контрольные вопросы

1. Дайте сравнительную оценку термопреобразователей сопротивления и термисторов.
2. В каких случаях целесообразно использовать термисторы?
3. Какие схемы используются для преобразования сопротивления термопреобразователей в электрический сигнал?
4. Как обеспечивается снижение влияния сопротивления линии связи на результат измерения температуры?
5. Дайте сравнительную оценку термопреобразователей сопротивления и термоэлектрических преобразователей.

Занятие № 7 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ДАТЧИКОВ

Цель занятия: изучить принцип действия тензорезисторных датчиков.

Принцип действия тензорезисторных датчиков

Для измерения веса, силы, давления жидких и газообразных сред широкое распространение получили тензорезисторные датчики [5]. Такие датчики содержат упругий элемент, на который наклеиваются тензорезисторы. Принцип работы тензорезисторов основан на явлении тензоэффекта – изменении электрического сопротивления проводника (полупроводника) при его механической деформации. Относительное приращение сопротивления $\Delta R/R$ линейно зависит от относительной деформации $\Delta l/l$ проводника:

$$\Delta R/R = S \Delta l/l ,$$

где S – коэффициент тензочувствительности.

Тензорезисторы обычно изготавливаются из сплава константан, обладающего большим коэффициентом тензочувствительности ($S = 1,9...2,1$), высоким удельным сопротивлением и температурной стабильностью. В качестве диэлектрической подложки (основы) тензорезисторов используют полимерные пленки или бумагу.

Наиболее высокую точность имеют датчики с фольговыми тензорезисторами (рисунок 7.1), получаемыми методом травления тонкой константановой фольги, нанесенной на подложку из полимерной пленки. В многоэлементных тензорезисторах на общей подложке объединены два или четыре фольговых резистивных элемента. Тензорезисторы наклеивают на упругий элемент таким образом, чтобы деформация прикладывалась вдоль их базы (то есть вдоль проводников тензорезистора).

На рисунке 7.1, в показан двухэлементный тензорезистор, резистивные элементы которого ориентированы взаимно перпендикулярно. Один элемент может быть активным, а второй – компенсационным. Компенсационный резистор ориентирован перпендикулярно рабочему тензорезистору, поэтому деформация прикладывается поперек базы и практически не изменяет его сопротивления. Такую конфигурацию используют в датчиках, где упругий элемент испытывает рабочие деформации одного знака. Компенсационные тензорезисторы необходимы для построения полного моста и обеспечения температурной компенсации. Тензорезистор, показанный на рисунке 7.1, в может быть применен также для преобразования двухосных деформаций в перпендикулярных направлениях. На рисунке 7.1, г показан тензорезистор с четырьмя активными элементами, предназначенный

для наклеивания на мембрану датчика давления. Здесь два тензорезистора работают на растяжение, а два – на сжатие.

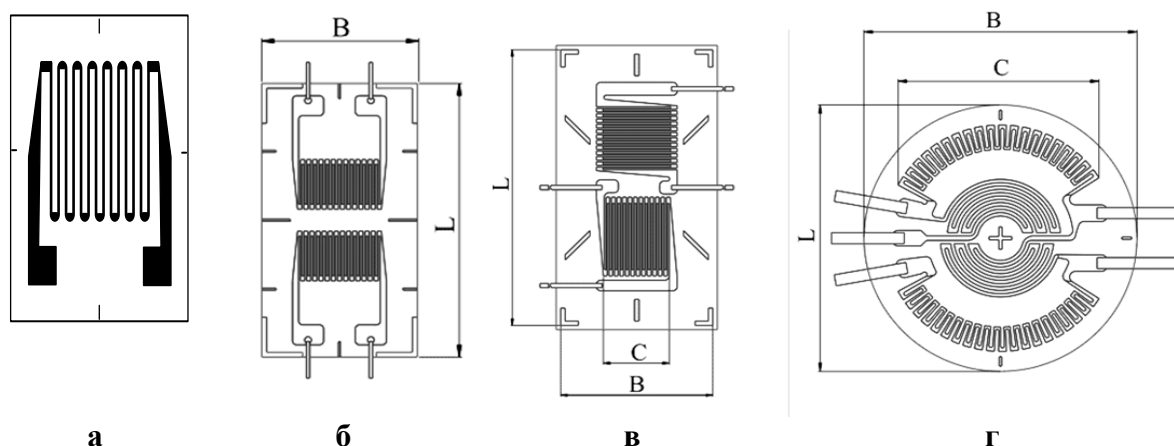


Рисунок 7.1 - Фольговые тензорезисторы: а – одинарный;
б, в – двухэлементные; г – четырехэлементный

Фольговые тензорезисторы используются для измерения деформаций конструкций, например, в авиастроении. Для этой цели тензорезисторы наклеивают на поверхность испытываемой конструкции.

В датчиках давления часто применяются кремниевые тензорезисторы, получаемые методами полупроводниковой технологии на упругой мембране, например, из искусственного сапфира. По сравнению с фольговыми, полупроводниковые тензорезисторы обеспечивают более высокую чувствительность, но меньшую точность измерения. Типичные значения погрешности датчиков с фольговыми тензорезисторами – 0,02...0,05 %, с полупроводниковыми тензорезисторами – 0,25...1,0 %.

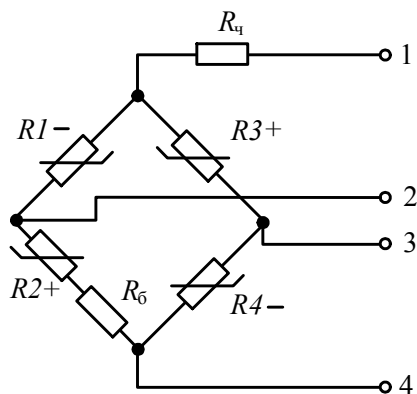


Рисунок 7.2 - Схема тензодатчика

Для изготовления упругого элемента применяются пружинные стали и алюминиевые сплавы с соответствующей термообработкой. Метрологические характеристики датчика в сильной степени зависят от качества наклейки тензорезисторов, выполняемой по специальной технологии. Как правило, используют четыре тензорезистора, включенных по мостовой схеме. Наиболее предпочтителен вариант, когда два тензорезистора работают на растяжение, а два – на сжатие с одинаковой величиной деформации (рисунок 7.2). Тензорезисторы с одинаковым знаком деформации включают в противоположные плечи моста, благодаря чему выходной сигнал датчика формируется за счет приращений сопротивлений всех четырех тензорезисторов. При этом также компенсируется нелинейность характеристики преобразования мостовой схемы.

Выходной сигнал тензодатчика при номинальной нагрузке рассчитывается по формуле

$$U_{\text{ВЫХ}} = \text{РКП} \cdot U_{\text{ТД}},$$

где РКП – рабочий коэффициент передачи тензодатчика, мВ/В;

$U_{\text{ТД}}$ – напряжение на входе тензодатчика.

Типичные значения РКП находятся в диапазоне 1,5...2,5 мВ/В.

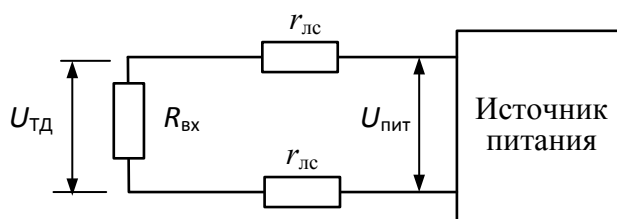


Рисунок 7.3 – Схема цепи питания тензодатчика

Тензодатчик может подключаться по четырех- или шестипроводной схеме. При четырехпроводной схеме по проводам 1, 4 (рисунок 7.2) на тензодатчик подается питание, провода 2, 3 используются для передачи выходного сигнала. Рассмотрим схему цепи питания тензодатчика (рисунок 7.3). Напряжение на входе тензодатчика

$$U_{\text{ТД}} = U_{\text{пит}} \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}} + 2r_{\text{лс}}},$$

где $U_{\text{тд}}$ – напряжение на входе тензодатчика;
 $U_{\text{пит}}$ – напряжение на выходе источника питания;
 $R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление тензодатчика;
 $r_{\text{лс}}$ – сопротивление одного провода линии связи.

Вследствие падения напряжения на проводах линии связи, напряжение питания тензодатчика будет меньше, чем напряжение источника питания. Начальное падение напряжения на проводах можно скомпенсировать при наладке измерительной системы путем увеличения напряжения на выходе источника питания тензодатчика. Однако изменения сопротивлений проводов при колебаниях температуры при этом остаются не скомпенсированными и приводят к возникновению дополнительной погрешности измерения. Поэтому четырехпроводная схема применяется в случаях, когда сопротивление линии связи между датчиком и источником питания мало, и падением напряжения на проводах линии можно пренебречь.

При шестипроводной схеме подключения влияние изменения сопротивления линии связи (в определенных пределах) компенсируется автоматически. Принцип действия такой компенсации заключается в том, что источник питания с помощью двух дополнительных проводов контролирует напряжение $U_{\text{тд}}$ и поддерживает его на требуемом уровне. Недостатком шестипроводной схемы подключения является более высокая стоимость кабеля связи, который в этом случае должен иметь больше проводов.

Задачи

1. Рассчитать выходной сигнал тензодатчика при номинальной нагрузке по следующим данным: $\text{РКП} = 2 \text{ мВ/В}$, $U_{\text{пит}} = 10 \text{ В}$.

2. Номинальное усилие тензодатчика равно 10 кН , $\text{РКП} = 2 \text{ мВ/В}$, $U_{\text{пит}} = 10 \text{ В}$. Определить выходной сигнал тензодатчика при усилении 6 кН .

3. Входное сопротивление тензодатчика равно 405 Ом , напряжение источника питания $U_{\text{пит}} = 10 \text{ В}$, сопротивление провода линии связи $r_{\text{лс}} = 3 \text{ Ом}$. Определить напряжение питания $U_{\text{тд}}$ на входе тензодатчика.

4. Входное сопротивление тензодатчика равно 360 Ом , напряжение источника питания $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В}$, сопротивление провода линии связи $r_{\text{лс}} = 5 \text{ Ом}$. Определить приращение выходного сигнала тензодат-

чика, вызванное изменением температуры на 30 °С. Температурный коэффициент сопротивления проводов линии связи равен 0,004 °С⁻¹.

5. Линия связи тензодатчика имеет длину 50 м, сечение одного провода 1 мм². Входное сопротивление тензодатчика 370 Ом, напряжение источника питания $U_{\text{пит}} = 5$ В. Определить дополнительную погрешность, вызванную изменением температуры линии связи на 20 °С. Температурный коэффициент сопротивления проводов линии связи равен 0,004 °С⁻¹.

Контрольные вопросы

1. В каком направлении должна прикладываться деформация к тензорезистору?
2. Для чего тензорезисторы объединяют в мостовую схему?
3. Каким образом включают в плечи моста четыре активных тензорезистора?
4. Как располагают на упругом элементе, и в какие плечи моста включают компенсационные тензорезисторы?
5. Как рассчитать уровень выходного сигнала тензодатчика?
6. Укажите составляющие погрешности измерения массы с помощью тензорезисторных датчиков?
7. Как устраняется погрешность, обусловленная сопротивлением линии связи?

Литература

1. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
2. Нефедов В.И., Балагур А.А., Мельчаков В.Н., Федорова Е.В. Сборник задач по метрологии: учеб. пособие / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет).- М. 2010.- 124 с.
3. ГОСТ 6651 – 2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. Стандартиформ, 2011.
4. ГОСТ 6616-94 Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. Минск: Изд-во стандартов, 1998.
5. Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж. и др. Датчики измерительных систем: В 2 кн. Кн. 2. Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. - 424 с.

Учебно-методическое издание

Григорьян Сергей Георгиевич

Метрология, стандартизация и технические измерения

Учебно-методическое пособие
для практических занятий

Редактор *Н.А.Юшко*

Подписано в печать 07.07.2017 Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 3,02 Уч.- изд. л. 3,25 Тираж 50

Южно-Российский государственный политехнический университет
(НПИ) имени М.И.Платова
Редакционно-издательский отдел ЮРГПУ(НПИ)