Практическая работа №3

Сенсоры и датчики. Расчёт статических характеристик и погрешностей

Цель работы: изучить устройство и статические характеристики термопреобразователей сопротивления, термоэлектрических преобразователей и тензорезисторных датчиков, научиться рассчитывать выходной сигнал датчика и определять по нему измеряемую величину, оценивать нелинейность характеристики и погрешности измерения.

Оборудование и программное обеспечение: калькулятор или табличный редактор (Microsoft Excel, LibreOffice Calc).

Краткие теоретические сведения

Структура и характеристики датчика

Датчик (измерительный преобразователь) преобразует измеряемую физическую величину x в сигнал y, удобный для передачи и обработки. В общем случае он состоит из чувствительного элемента, измерительной схемы и нормирующего преобразователя (рисунок 1). Чувствительный элемент непосредственно воспринимает измеряемую величину и изменяет свой параметр z (сопротивление, ЭДС, ёмкость).

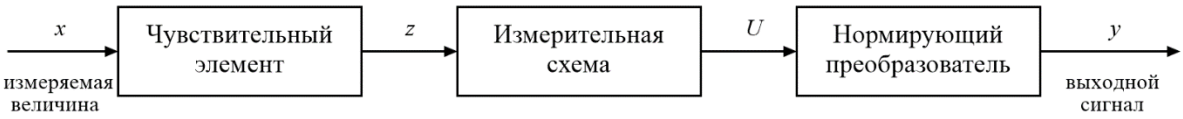


Рисунок 1 – Структура датчика

По принципу действия чувствительные элементы делят на параметрические (под действием x изменяется параметр — сопротивление, ёмкость, индуктивность; нужен внешний источник питания) и генераторные (под действием x вырабатывается ЭДС, заряд или ток). Зависимость $y = f(x)$ в установившемся режиме называют статической характеристикой. Чувствительность датчика

$$S = \Delta y / \Delta x$$

показывает, на сколько изменяется выходной сигнал при изменении измеряемой величины на единицу. Если характеристика нелинейна, чувствительность различна в разных точках диапазона; на практике пользуются средней чувствительностью по диапазону.

Термопреобразователи сопротивления

Действие термопреобразователя сопротивления (ТС) основано на зависимости электрического сопротивления металла от температуры. Чувствительный элемент — платиновая или медная проволока либо плёнка. Номинальная статическая характеристика платинового ТС в диапазоне 0…850 °C

$$R(t) = R0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2),$$

где R0 — сопротивление при 0 °C (для Pt100 R0 = 100 Ом), $A = 3{,}9083 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1}, $B = -5{,}775 \cdot 10^{-7}$ °C^{-2} (стандартные коэффициенты для платины с $\alpha = 0{,}00385$ °C^{-1}).

Характеристика близка к линейной (рисунок 2), но квадратичный член делает её слегка выпуклой. Медные ТС (Cu50, Cu100) имеют практически линейную характеристику $R(t) = R0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$, $\alpha = 4{,}28 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1}, в диапазоне −50…+150 °C.

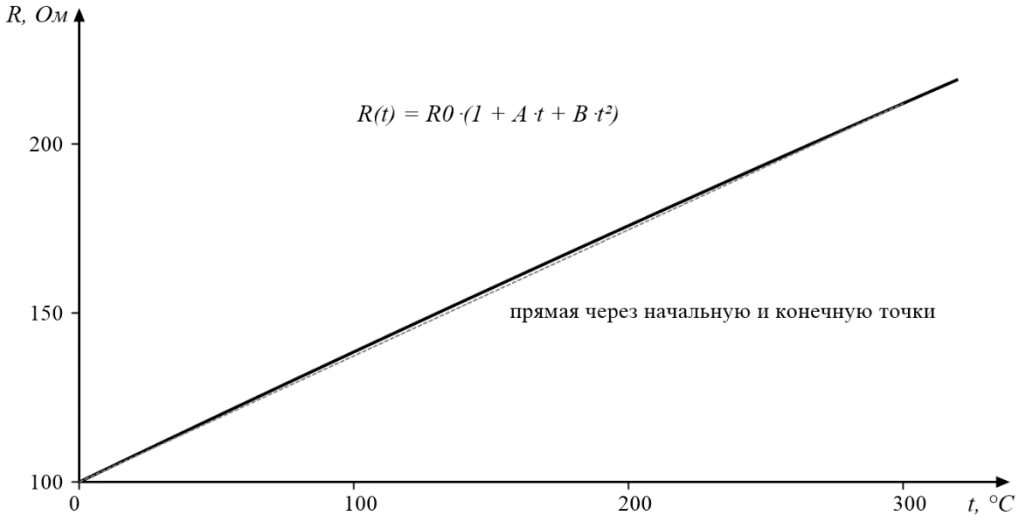


Рисунок 2 – Статическая характеристика термопреобразователя Pt100

Пример расчёта. Сопротивление Pt100 при t = 150 °C: $R = 100 \cdot (1 + 3{,}9083 \cdot 10^{-3} \cdot 150 - 5{,}775 \cdot 10^{-7} \cdot 150^2) = 100 \cdot (1 + 0{,}5862 - 0{,}0130) = 157{,}33$ Ом.

Обратная задача — определение температуры по измеренному сопротивлению — решается как квадратное уравнение относительно t:

$$t = (-A + \sqrt{(A^2 - 4B \cdot (1 - R/R0)})) / (2B).$$

Приближённо, считая характеристику линейной с $\alpha = 0{,}00385$ °C^{-1}: $t \approx (R/R0 - 1) / \alpha$.

Пример расчёта. Измерено R = 120 Ом. Точная формула: $t = (-3{,}9083 \cdot 10^{-3} + \sqrt{(1{,}5275 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot (-5{,}775 \cdot 10^{-7}) \cdot (1 - 1{,}2)})) / (2 \cdot (-5{,}775 \cdot 10^{-7})) = 51{,}57$ °C. Линейное приближение: $t \approx 0{,}2 / 0{,}00385 = 51{,}95$ °C; погрешность приближения 0,38 °C.

Нелинейность характеристики оценивают по наибольшему отклонению $\Delta R_{нл}$ реальной характеристики от прямой, проведённой через начальную и конечную точки диапазона, в процентах от изменения сопротивления на диапазоне:

$$\delta_{нл} = \Delta R_{нл} / (R(t_{max}) - R(t_{min})) \cdot 100\ \%.$$

Пример расчёта. Диапазон 0…300 °C: R(300) = 212,05 Ом. Прямая через точки (0; 100) и (300; 212,05) при t = 150 °C даёт 156,03 Ом, а по характеристике R(150) = 157,33 Ом. $\Delta R_{нл} = 1{,}30$ Ом; $\delta_{нл} = 1{,}30 / 112{,}05 \cdot 100 = 1{,}16$ %. Средняя чувствительность $S = 112{,}05 / 300 = 0{,}374$ Ом/°C, поэтому нелинейность соответствует ошибке $1{,}30 / 0{,}374 \approx 3{,}5$ °C, если пользоваться линейной шкалой.

Термоэлектрические преобразователи (термопары)

Термопара — генераторный датчик: два разнородных проводника (электроды), сваренные в рабочий спай, вырабатывают термо-ЭДС, зависящую от разности температур рабочего спая t и свободных (холодных) спаев t0 (рисунок 3):

$$E_{изм} = E(t) - E(t0),$$

где E(t) — значение номинальной статической характеристики (НСХ) при температуре t, определённой при t0 = 0 °C. Значения НСХ приводятся в стандартных таблицах; фрагмент таблицы для термопары типа K (хромель — алюмель) приведён в таблице 1.

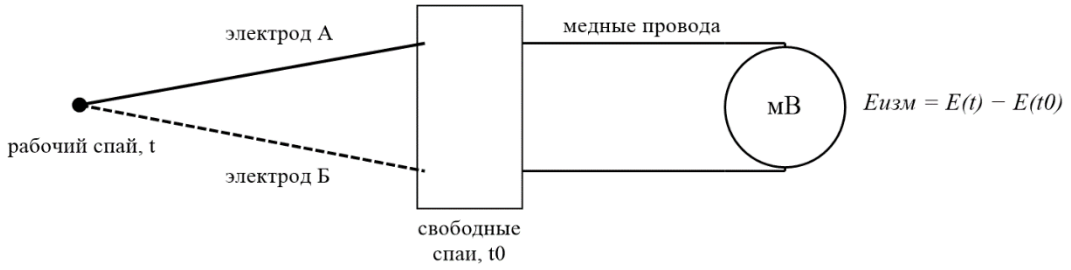


Рисунок 3 – Схема включения термопары

Таблица 1 – НСХ термопары типа K (свободные спаи при 0 °C)

t, °C	E, мВ	t, °C	E, мВ	t, °C	E, мВ
0	0	30	1,203	400	16,397
20	0,798	100	4,096	500	20,644
25	1,000	200	8,138	600	24,905
		300	12,209	700	29,129
				800	33,275

Свободные спаи обычно находятся при температуре помещения, а не при 0 °C, поэтому измеренную ЭДС исправляют (компенсируют): E(t) = Eизм + E(t0), после чего по таблице НСХ находят t линейной интерполяцией между соседними строками:

$$t = t1 + (t2 - t1) \cdot (E - E1) / (E2 - E1).$$

Пример расчёта. Измерено Eизм = 11,0 мВ при температуре свободных спаев t0 = 25 °C. E(t) = 11,0 + 1,000 = 12,0 мВ; это значение лежит между 8,138 мВ (200 °C) и 12,209 мВ (300 °C): t = 200 + 100 · (12,0 − 8,138) / 4,071 = 294,9 °C. Без компенсации по Eизм = 11,0 мВ получилось бы 200 + 100 · 2,862 / 4,071 = 270,3 °C — ошибка около 25 °C.

Обратите внимание. Значения таблицы 1 соответствуют международному стандарту на термопары IEC 60584-1 (ГОСТ Р 8.585). Средняя чувствительность термопары типа K около 41 мкВ/°C, поэтому ошибка компенсации в 1 °C по температуре свободных спаев даёт ошибку около 1 °C в измеряемой температуре.

Тензорезисторные датчики

Тензорезистор — проводниковая или полупроводниковая решётка, наклеенная на упругий элемент. При деформации упругого элемента изменяется сопротивление тензорезистора:

$$\Delta R / R = k \cdot \varepsilon,$$

где $\varepsilon = \Delta l / l$ — относительная деформация, k — коэффициент тензочувствительности (для металлических тензорезисторов $k \approx 2$). Изменения сопротивления очень малы, поэтому тензорезисторы включают в мост (рисунок 4). При

равных сопротивлениях плеч мост уравновешен (Uвых = 0); при деформации выходное напряжение пропорционально числу активных плеч n:

$$U_{вых} \approx n \cdot U \cdot k \cdot \varepsilon / 4,$$

где U — напряжение питания моста; n = 1 — четвертьмост (один активный тензорезистор), n = 2 — полумост, n = 4 — полный мост (активные тензорезисторы включены так, что их сигналы складываются).

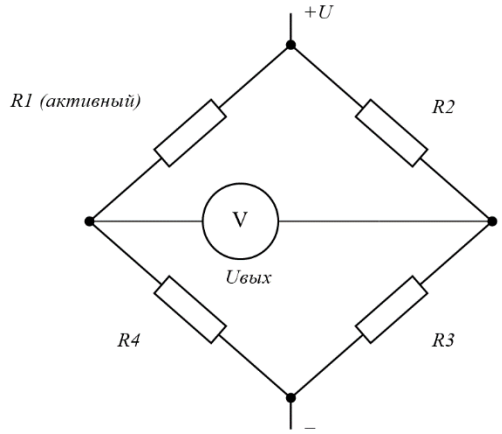


Рисунок 4 – Мостовая схема включения тензорезистора (четвертьмост)

Пример расчёта. k = 2, $\varepsilon = 500 \cdot 10^{-6}$ (500 мкм/м), U = 10 В. $\Delta R/R = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0{,}001$ (для тензорезистора 350 Ом ΔR = 0,35 Ом). Четвертьмост: Uвых = 10 · 0,001 / 4 = 2,5 мВ; полумост — 5,0 мВ; полный мост — 10 мВ.

Погрешности измерения

Абсолютная погрешность Δ = Хизм − Хд — разность измеренного и действительного (эталонного) значений. Относительная погрешность δ = Δ / Хд · 100 %. Приведённая погрешность γ = Δ / XN · 100 %, где XN — нормирующее значение (обычно ширина диапазона измерения). Класс точности прибора — наименьшее число стандартного ряда (0,1; 0,2; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0), не меньшее наибольшей приведённой погрешности.

Пример расчёта. Термометр с диапазоном 0…500 °C в точке 250 °C (по эталону) показывает 253 °C. Δ = 3 °C; δ = 3 / 250 · 100 = 1,2 %; γ = 3 / 500 · 100 = 0,6 %. Если это наибольшая погрешность по диапазону, прибор соответствует классу точности 1,0.

Порядок выполнения работы

Шаг 1. Статическая характеристика Pt100

Рассчитайте сопротивление Pt100 для температур из карточки варианта и сведите результаты в таблицу. Для каждой точки вычислите также значение по прямой, проведённой через начальную и конечную точки диапазона, и их разность. Постройте характеристику R(t). Определите среднюю чувствительность S, нелинейность δнл и соответствующую ей ошибку в градусах.

Шаг 2. Определение температуры по сопротивлению

Для сопротивления Rизм из карточки варианта найдите температуру по точной формуле и по линейному приближению. Определите погрешность линейного приближения.

Шаг 3. Термопара

По измеренной ЭДС и температуре свободных спаев из карточки варианта определите температуру рабочего спая с компенсацией температуры свободных спаев и без неё (по таблице 1 с линейной интерполяцией). Вычислите ошибку, вызванную отсутствием компенсации.

Шаг 4. Тензорезисторный мост

Для данных карточки варианта рассчитайте относительное изменение сопротивления тензорезистора и выходное напряжение четвертьмоста, полумоста и полного моста. Выберите простейшую схему, обеспечивающую требуемое выходное напряжение.

Шаг 5. Погрешности и класс точности

По результатам поверки прибора из карточки варианта рассчитайте для каждой точки абсолютную, относительную и приведённую погрешности. Определите класс точности прибора.

Индивидуальное задание

Вариант 1 выполняют студенты с нечётным номером в списке группы, вариант 2 — с чётным. Выполните шаги 1–5 по данным карточки своего варианта.

Содержание отчёта

1) Тема и цель работы.

2) Таблица и график статической характеристики Pt100, расчёт чувствительности и нелинейности.

3) Расчёт температуры по сопротивлению.

4) Расчёт температуры по ЭДС термопары с компенсацией и без неё.

5) Расчёт тензорезисторного моста и выбор схемы.

6) Таблица погрешностей и класс точности прибора.

7) Ответы на контрольные вопросы и выводы.

Контрольные вопросы

1) Из каких основных частей состоит датчик? Каково назначение чувствительного элемента?

2) Чем параметрические датчики отличаются от генераторных? Приведите примеры.

3) Что такое статическая характеристика и чувствительность датчика?

4) На чём основан принцип действия термопреобразователя сопротивления? Почему его характеристика нелинейна?

5) Почему термо-ЭДС зависит от температуры свободных спаев? Как выполняется компенсация?

6) Определите температуру по ЭДС термопары типа K 8,138 мВ при температуре свободных спаев 0 °C.

7) Зачем тензорезисторы включают в мостовую схему? Как выходное напряжение зависит от числа активных плеч?

8) Чем относительная погрешность отличается от приведённой?

9) Как определяется класс точности прибора?

10) Рассчитайте сопротивление медного ТС Cu50 при 100 °C.

Вариант 1

Исходные данные	Значение
Шаг 1: температуры для расчёта Pt100, °C	0, 50, 100, 150, 200
Шаг 2: измеренное сопротивление Pt100 Rизм, Ом	145,0
Шаг 3: ЭДС термопары типа K Eизм, мВ	15,2
Шаг 3: температура свободных спаев t0, °C	20
Шаг 4: коэффициент тензочувствительности k	2,1
Шаг 4: деформация ε, мкм/м (·10⁻⁶)	800
Шаг 4: напряжение питания моста U, В	5
Шаг 4: требуемое выходное напряжение, не менее, мВ	6
Шаг 5: диапазон прибора, °C	0…200
Шаг 5: эталон / показание прибора, °C	50 / 50,8; 100 / 101,2; 150 / 151,5; 200 / 201,0

Результат	Значение
S, Ом/°C / δнл, % / ошибка, °C	
t по Rизм: точно / линейно, °C	
t термопары: с компенсацией / без, °C	
Uвых: 1/4 / 1/2 / полный мост, мВ; выбранная схема	
γmax, % / класс точности	

Вариант 2

Исходные данные	Значение
Шаг 1: температуры для расчёта Pt100, °C	0, 100, 200, 300, 400
Шаг 2: измеренное сопротивление Pt100 Rизм, Ом	175,0
Шаг 3: ЭДС термопары типа K Eизм, мВ	20,0
Шаг 3: температура свободных спаев t0, °C	30
Шаг 4: коэффициент тензочувствительности k	2,0
Шаг 4: деформация ε, мкм/м (·10⁻⁶)	300
Шаг 4: напряжение питания моста U, В	10
Шаг 4: требуемое выходное напряжение, не менее, мВ	2,5
Шаг 5: диапазон прибора, °C	0…400
Шаг 5: эталон / показание прибора, °C	100 / 99,0; 200 / 198,4; 300 / 297,6; 400 / 398,8

Результат	Значение
S, Ом/°C / δнл, % / ошибка, °C	
t по Rизм: точно / линейно, °C	
t термопары: с компенсацией / без, °C	
Uвых: 1/4 / 1/2 / полный мост, мВ; выбранная схема	
γmax, % / класс точности	