Практическая работа №4

Преобразователи сигналов. Масштабирование, усиление, фильтрация, аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование

Цель работы: изучить назначение и основные виды преобразователей сигналов в системах автоматики, научиться рассчитывать линейное масштабирование сигнала, нормирующий усилитель на операционном усилителе, фильтр нижних частот, параметры аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей.

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

Краткие теоретические сведения

Назначение преобразователей сигналов

Сигнал чувствительного элемента, как правило, мал (единицы — десятки милливольт), имеет нестандартный диапазон и содержит помехи. Преобразователи сигналов приводят его к виду, удобному для передачи и обработки: усиливают, смещают, масштабируют до унифицированного диапазона, подавляют помехи, обеспечивают гальваническую развязку, преобразуют аналоговый сигнал в цифровой код и обратно.

Унифицированные (нормированные) аналоговые сигналы позволяют соединять датчики, регуляторы и исполнительные устройства разных производителей. Наиболее распространены сигналы напряжения 0…10 В, 0…5 В, 1…5 В и сигналы тока 0…5 мА, 0…20 мА, 4…20 мА. Токовые сигналы менее чувствительны к сопротивлению линии и помехам, сигналы напряжения проще в обработке.

Линейное масштабирование

Если преобразователь линеен, значение выходного сигнала y для измеряемой величины x в диапазоне xmin…xmax при выходном диапазоне ymin…ymax:

$$y = y_{min} + (x - x_{min}) \cdot (y_{max} - y_{min}) / (x_{max} - x_{min}).$$

Обратное преобразование (по сигналу найти измеряемую величину) выполняется по той же формуле с переменой ролей x и y.

Пример расчёта. Датчик температуры с диапазоном −50…+150 °C и выходом 0…10 В. При t = 30 °C: U = 0 + (30 − (−50)) · 10 / 200 = 4,0 В. Обратно: при U = 6,5 В t = −50 + 6,5 · 200 / 10 = 80 °C.

Нормирующий усилитель на операционном усилителе

Операционный усилитель (ОУ) — усилитель постоянного тока с очень большим коэффициентом усиления, свойства которого задаются цепью отрицательной обратной связи. В неинвертирующем включении (рисунок 1) коэффициент усиления

$$K = U_{вых} / U_{вх} = 1 + R2 / R1.$$

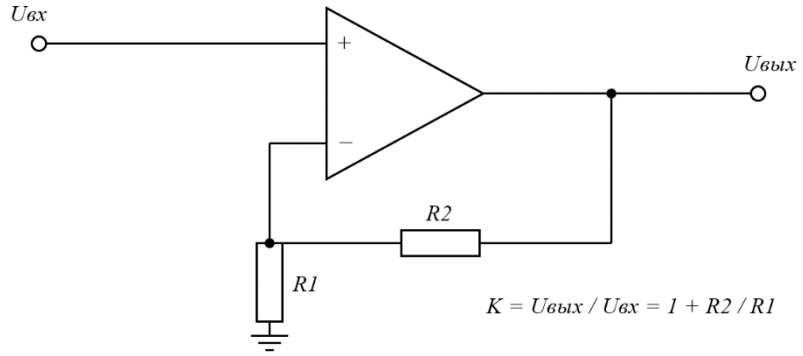


Рисунок 1 – Неинвертирующий усилитель на операционном усилителе

Для нормирующего усилителя требуемый коэффициент находят как отношение максимального выходного сигнала к максимальному входному: K = Uвых.max / Uвх.max. Задавшись R1, находят R2 = (K − 1) · R1 и выбирают ближайший номинал ряда E24 (1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1 × 10^n), после чего проверяют фактический коэффициент и максимальное выходное напряжение.

Пример расчёта. Сигнал моста 0…50 мВ нужно привести к 0…10 В. K = 10 / 0,05 = 200. При R1 = 2 кОм R2 = 199 · 2 = 398 кОм; ближайший номинал E24 — 390 кОм. Фактически K = 1 + 390 / 2 = 196, Uвых.max = 196 · 0,05 = 9,8 В (отклонение −2 %; при необходимости его устраняют подстроечным резистором).

Фильтр нижних частот

Полезный сигнал датчиков технологических параметров изменяется медленно, а помехи (наводки от сети 50 Гц, импульсные помехи) — быстро. Простейший фильтр нижних частот — RC-цепь (рисунок 2). Частота среза, на которой амплитуда сигнала уменьшается до 0,707 исходной,

$$f_{ср} = 1 / (2\pi \cdot R \cdot C), \quad R = 1 / (2\pi \cdot f_{ср} \cdot C).$$

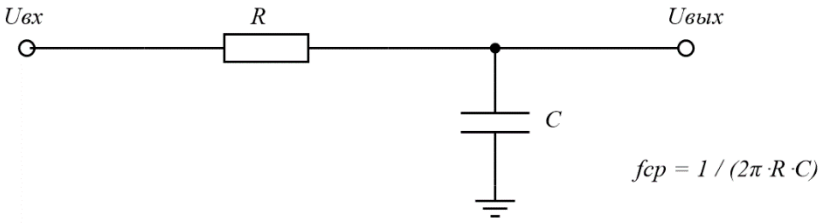


Рисунок 2 – RC-фильтр нижних частот

Выше частоты среза ослабление растёт пропорционально частоте: помеха с частотой в 10 раз выше fср ослабляется примерно в 10 раз. Частоту среза выбирают значительно ниже частоты помехи, но выше частоты изменения полезного сигнала.

Пример расчёта. R = 10 кОм, C = 4,7 мкФ: fср = 1 / (2π · 10 000 · 4,7·10^{-6}) = 3,39 Гц. Помеха 50 Гц ослабляется примерно в 50 / 3,39 ≈ 15 раз.

Аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ставит в соответствие входному напряжению 0…Uоп целое число — код D. Число возможных кодов N-разрядного АЦП равно 2^N, шаг квантования (единица младшего разряда)

$$q = U_{оп} / 2^N, \quad D = \text{целая часть } (U_{вх} / q).$$

Погрешность квантования не превышает одного шага q (рисунок 3). Чтобы различать измеряемую величину с разрешением Δx на диапазоне X, число уровней должно быть не меньше X / Δx, отсюда наименьшая разрядность $N \geq \log_2(X / \Delta x)$.

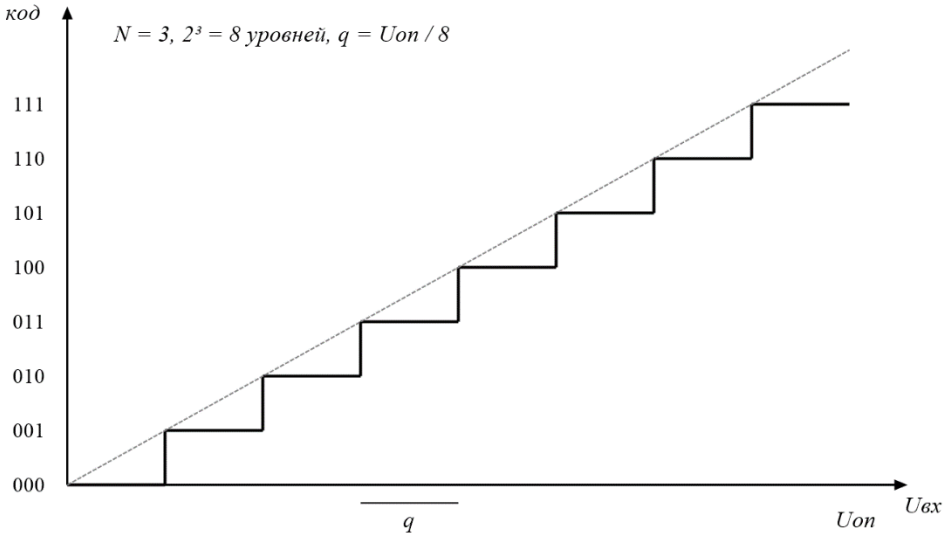


Рисунок 3 – Характеристика квантования трёхразрядного АЦП

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) выполняет обратное преобразование: выходное напряжение N-разрядного ЦАП при коде D

$$U_{вых} = U_{оп} \cdot D / 2^N.$$

Пример расчёта. АЦП 10 разрядов, Uоп = 3,3 В: q = 3,3 / 1 024 = 3,22 мВ; при Uвх = 1,5 В D = целая часть (1,5 / 0,00322) = 465. Для разрешения 1/1 000 диапазона нужно 2^N ≥ 1 000, N = 10. ЦАП 12 разрядов, Uоп = 2,5 В, код D = 1 000: Uвых = 2,5 · 1 000 / 4 096 = 0,610 В.

Порядок выполнения работы

По карточке варианта рассчитайте измерительный канал: датчик — нормирующий усилитель — фильтр — АЦП, и канал вывода управляющего сигнала через ЦАП.

Шаг 1. Масштабирование

Запишите формулу линейного масштабирования для диапазонов датчика и нормированного сигнала из карточки варианта. Найдите значение сигнала для заданного значения измеряемой величины и значение измеряемой величины для заданного сигнала.

Шаг 2. Нормирующий усилитель

Рассчитайте коэффициент усиления, необходимый для приведения сигнала моста к нормированному диапазону. При заданном R1 найдите R2, выберите номинал из ряда E24 и определите фактический коэффициент усиления, максимальное выходное напряжение и его отклонение от требуемого в процентах. Начертите схему усилителя с номиналами.

Шаг 3. Фильтр

Рассчитайте сопротивление RC-фильтра для заданных частоты среза и ёмкости, выберите номинал из ряда E24 и определите фактическую частоту среза. Оцените, во сколько раз фильтр ослабляет помеху 50 Гц.

Шаг 4. АЦП

Определите наименьшую разрядность АЦП, обеспечивающую требуемое разрешение по измеряемой величине. Для 12-разрядного АЦП с заданным Uоп рассчитайте шаг квантования (в вольтах и в единицах измеряемой величины), код для заданного входного напряжения и соответствующее ему значение измеряемой величины.

Шаг 5. ЦАП

Рассчитайте выходное напряжение ЦАП для заданного кода и код, необходимый для получения напряжения, равного половине диапазона.

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) Формула масштабирования и расчёты шага 1.
3) Схема и расчёт нормирующего усилителя.
4) Расчёт RC-фильтра.
5) Расчёт АЦП и ЦАП.
6) Ответы на контрольные вопросы и выводы.

Контрольные вопросы

1) Для чего нужны преобразователи сигналов в системах автоматики?

2) Какие унифицированные аналоговые сигналы вы знаете? Каковы достоинства токовых сигналов?

3) Запишите формулу линейного масштабирования. Рассчитайте сигнал 0…10 В для 75 % диапазона датчика.

4) Как рассчитывается коэффициент усиления неинвертирующего усилителя на ОУ?

5) Почему после выбора номинала из ряда E24 нужно проверять фактический коэффициент усиления?

6) Что такое частота среза RC-фильтра? Как её выбирают?

7) Что такое разрядность и шаг квантования АЦП?

8) Как определить наименьшую разрядность АЦП для заданного разрешения?

9) Рассчитайте выходное напряжение 8-разрядного ЦАП с Uоп = 5 В при коде 64.

10) Почему разрешение АЦП не равно точности измерения?

Вариант 1

Исходные данные	Значение
Датчик и диапазон измерения	датчик давления 0…1,6 МПа
Выходной сигнал измерительного моста	0…20 мВ
Нормированный сигнал на выходе усилителя	0…10 В
Шаг 1: значение измеряемой величины / значение сигнала	1,2 МПа / 3,2 В
Шаг 2: сопротивление R1, кОм	1
Шаг 3: частота среза fср, Гц / ёмкость С, мкФ	5 / 1
Шаг 4: требуемое разрешение	0,001 МПа
Шаг 4: опорное напряжение АЦП Uоп, В / входное напряжение, В	10 / 6,25
Шаг 5: ЦАП	8 разрядов, Uоп = 10 В, код 150

Результат	Значение
Сигнал для заданной величины / величина для заданного сигнала	
K / R2 (E24) / Kфакт / Uвых.max	
R (E24) / fср.факт / ослабление помехи 50 Гц	
Nmin / q / код / значение величины	
Uвых ЦАП / код для половины диапазона	

Вариант 2

Исходные данные	Значение
Датчик и диапазон измерения	датчик температуры 0…500 °C
Выходной сигнал измерительного моста	0…25 мВ
Нормированный сигнал на выходе усилителя	0…5 В
Шаг 1: значение измеряемой величины / значение сигнала	320 °C / 1,8 В
Шаг 2: сопротивление R1, кОм	1
Шаг 3: частота среза fср, Гц / ёмкость C, мкФ	2 / 10
Шаг 4: требуемое разрешение	0,2 °C
Шаг 4: опорное напряжение АЦП Uоп, В / входное напряжение, В	5 / 3,1
Шаг 5: ЦАП	10 разрядов, Uоп = 5 В, код 512

Результат	Значение
Сигнал для заданной величины / величина для заданного сигнала	
K / R2 (E24) / Kфакт / Uвых.max	
R (E24) / fср.факт / ослабление помехи 50 Гц	
Nmin / q / код / значение величины	
Uвых ЦАП / код для половины диапазона	