

# **ЦИФРОВАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

## **ГЛАВА 6: ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**В.Г. Кнорринг**

# ГЛАВА 6. ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНАЛОГО- ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Содержание:

- Общие соображения
- Техническое задание
- Выбор структуры устройства и масштабирование
- Выбор разрядности АЦП
- Выбор быстродействия АЦП
- Определение задач фильтрации и выбор фильтров
- Выбор способов коррекции аддитивной и мультипликативной погрешностей
- Выбор способов линеаризации характеристики канала
- Оценивание метрологических характеристик устройства

# ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ЦИТ

- Объекты проектирования и решаемые задачи (проверка технической идеи, поиск ниши на рынке, доработка существующего изделия и т. д.) разнообразны, и их трудно охватить в лекционном курсе.
- Устройства, выполняющие преобразование код→аналог, приходится проектировать сравнительно редко. То же можно сказать о преобразователях аналог→код частотно-временной и пространственных областей; к тому же они проще преобразователей электрической области.
- Исходя из сказанного, в данной главе будут рассмотрены некоторые (далеко не все) вопросы, возникающие при проектировании устройств (в общем случае многоканальных), выполняющих преобразование напряжение→код. Будет подразумеваться, что напряжение поступает от тех или иных датчиков.

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

- Основные положения технического задания формулируются Заказчиком (при учебном проектировании – преподавателем).
- На основе этих положений Исполнитель (студент) составляет развёрнутое техническое задание, которое утверждается Заказчиком и служит основанием для принятия или непринятия выполненной работы.
- В развёрнутом техническом задании должны быть отражены существенные *внешние* характеристики проектируемого изделия (включая метрологические). Внутренние его особенности, как правило, не оговариваются в задании и подлежат выбору в ходе проектирования.

# ВЫБОР СТРУКТУРЫ УСТРОЙСТВА

- Структура устройства отчасти определяется методом измерения, выбор которого выходит за рамки данного курса.
- Если метод и вид датчика (например, пьезоакселерометр или интегральный акселерометр с выходом по напряжению) выбран, то важным вопросом является распределение функций между узлами устройства. Например, фильтрация (или интегрирование) может выполняться в аналоговой части канала, а может и в микроконтроллере.
- Вопросами этого же типа являются: использование в многоканальном устройстве мультиплексора или нескольких параллельно работающих АЦП; использование АЦП, встроенного в микроконтроллер или отдельной микросхемы, и т. д.
- При проектировании следует не представлять выбранную структуру как единственно возможную, а сравнить ряд её вариантов.

# МАСШТАБИРОВАНИЕ

- Нельзя забывать о том, что результат измерения должен быть представлен в общепринятых единицах, а не в условных квантах.
- В домикроспроцессорную эпоху это требовало расчёта коэффициентов преобразования всех узлов канала так, чтобы каждый квант АЦП соответствовал определённой доле индицируемой единицы. С этим же был связан выбор структуры устройства (например, размещение в мосте постоянного тока кодоуправляемой проводимости в плече, *противолежащем* плечу с измеряемым резистором), а также выбор кодов, удобных для индикации (например, двоично-десятичного кода 2421).
- Сейчас все эти меры необязательны, так как нужный коэффициент преобразования и нужный для индикации код можно получить в микроконтроллере, осталось только по возможности обеспечить работу узлов канала в удобном для них диапазоне.

# ВЫБОР РАЗРЯДНОСТИ АЦП

- Разрядность АЦП во многих случаях (за исключением АЦП с  $\Sigma\Delta$ -модуляторами, которые могут сильно шуметь) определяет погрешность квантования, которая является одной из составляющих общей погрешности канала.
- Если выходная кодовая комбинация АЦП прямо поступает на индикатор, разрядность АЦП рекомендуется выбирать так, чтобы погрешность квантования была примерно в 5 раз меньше остальных составляющих общей погрешности.
- При выполнении в измерительном канале *любой вычислительной операции* над результатом преобразования АЦП становится *необходим запас по разрядности*. Пример будет ниже.
- Цена микросхем АЦП зависит от многих причин и не связана прямо с разрядностью, но вообще избыточная разрядность не приносит пользы.

# ВЫБОР БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЦП

- При выборе быстродействия (частоты преобразований) АЦП обычно исходят из ситуации использования АЦП для оцифровки непрерывного процесса с заданными допускаемыми динамическими погрешностями.
- При этом нужно каким-то способом задать динамические свойства входного сигнала АЦП. Обычно используют два способа:
  - Задание структурных свойств сигнала, например, максимальной скорости его изменения или производных более высоких порядков (при этом используются формулы со слайда 59 главы 5).
  - Задание спектральных свойств сигнала, например, граничной частоты спектра (при этом используется теорема Котельникова).

# ВЫБОР БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЦП ПРИ ЗАДАННОЙ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СИГНАЛА

Если задана максимальная скорость изменения сигнала и допускаяемая абсолютная погрешность восстановления, применима формула

$$\Delta_{\text{восст}} \leq \left| \frac{du}{dt} \right| \Delta t_{\text{дискр}},$$

Отсюда частота преобразований

$$f_{\text{дискр}} = \frac{1}{\Delta t_{\text{дискр}}} \geq \frac{\left| \frac{du}{dt} \right|_{\text{макс}}}{\Delta_{\text{восст}}}.$$

# ВЫБОР БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЦП ПРИ ЗАДАННОЙ ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНОЙ СИГНАЛА

Используем формулу линейной интерполяции  $\Delta_{\text{восст}} \leq \frac{1}{8} \left| \frac{d^2 u}{dt^2} \right| \Delta t_{\text{дискр}}^2$

для синусоидального сигнала  $u = U_m (\sin 2\pi t/T)$ .  
Его вторая производная  $d^2 u/dt^2 = -U_m (4\pi^2/T^2) (\sin 2\pi t/T)$ .  
Отношение второй производной к напряжению постоянно на всём периоде сигнала и равно  $-4\pi^2/T^2$ .

Поэтому, переходя от абсолютной погрешности восстановления  $\Delta_{\text{восст}}$  к относительной  $\delta_{\text{восст}} = \Delta_{\text{восст}}/u$ , получаем  $|\delta_{\text{восст}}| = 4\pi^2 \Delta t_{\text{дискр}}^2 / (8 T^2) = \pi^2 / (2n^2)$ , где  $n$  – число отсчётов на периоде сигнала.

Отсюда  $n = \pi / \sqrt{2 |\delta_{\text{восст}}|}$ , и для  $|\delta_{\text{восст}}| = 0,01$  получается  $n = 22,2$  отсчёта на периоде сигнала (соотношение П.В. Новицкого).

# ВЫБОР БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЦП ПРИ ЗАДАННОЙ ШИРИНЕ СПЕКТРА СИГНАЛА

- Если задана граничная частота  $f_{гр}$  интересующей нас части спектра сигнала, то по теореме Котельникова частота преобразований АЦП  $f_{дискр}$  должна быть
$$f_{дискр} > 2 f_{гр} .$$
- Все составляющие спектра, лежащие выше  $f_{гр}$ , должны быть удалены антиэлайзинговым фильтром.
- Например, спектр звука симфонического оркестра может быть очень широким, но если человеческое ухо не воспринимает звуков с частотами, превышающими 20 кГц, то для дискретизации достаточно принятая частота 44,1 кГц. Антиэлайзинговый фильтр должен подавлять все частоты, начиная с частоты Найквиста 22,05 кГц.
- В измерительной технике обычно выбирают быстродействие АЦП с большим запасом по отношению к требованиям теоремы Котельникова.

# ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ В ЦИТ

- **Антиэлайзинговая фильтрация** – подавление составляющих сигнала, частоты которых равны частоте Найквиста или превышают её.
- **Подавление помех**, отличающихся по спектру от полезного сигнала.
- **Частотный анализ** – разделение отдельных информативных составляющих полезного сигнала.
- **Обратная фильтрация** – коррекция искажений сигнала, вносимых инерционными звеньями канала (особая область теории измерений, выходящая за рамки данного курса).
- **Коррекция частотных характеристик** звеньев, входящих в петли отрицательной обратной связи, для обеспечения устойчивости и качества переходных процессов (задача из области теории управления, выходящая за рамки данного курса ).

# ВЫБОР И РАСЧЁТ ФИЛЬТРОВ

Вопросы выбора типов и структур фильтров, а также их расчёта, освещены в большом числе литературных источников. Как правило, они ориентированы на задачи радиотехники. Специально фильтрации в *измерительных устройствах* посвящена книга:

**Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990. – 192 с.**

В последующих ссылках – Гутников 1990.

# АНТИЭЛАЙЗИНГОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

- Антиэлайзинговый фильтр всегда является фильтром нижних частот.
- Выбирая частоту Найквиста выше граничной частоты спектра сигнала, получаем возможность разместить переходную область антиэлайзингового фильтра (между областями пропускания и подавления) между этими частотами.
- Наиболее узкую переходную область имеет **эллиптический фильтр**.
- АЦП с  $\Sigma\Delta$ -модуляторами, вследствие свойственной им передискретизации, не требуют сложного антиэлайзингового фильтра. Обычно достаточно простой сглаживающей цепочки  $RC$ .

# ФИЛЬТРАЦИЯ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ

При проектировании измерительных устройств приходится считаться с различными видами помех:

- Помехи в цепях питания (пульсации от источника питания и импульсные помехи от логических элементов).
- Аддитивные помехи во входном сигнале (шумы, высокочастотные наводки, помехи сетевой частоты и гармоник кратных ей частот). В некоторых случаях к помехам приходится относить неинформативные составляющие полезного сигнала; так, при исследовании биологических вызванных потенциалов помехой оказывается обычная энцефалограмма.
- Шумы, возникающие в элементах самого измерительного канала. Их можно рассматривать совместно с предыдущим видом помех.

# ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ ПИТАНИЯ

Помехи этого вида подавляются «развязывающими» (decoupling) конденсаторами в цепях питания

## TYPICAL CONNECTION DIAGRAM

Figure 22 shows a typical connection diagram for the devices.  $V_{REF}$  is taken internally from  $V_{DD}$  and, therefore,  $V_{DD}$  should be well decoupled. This provides an analog input range of 0 V to  $V_{DD}$ .

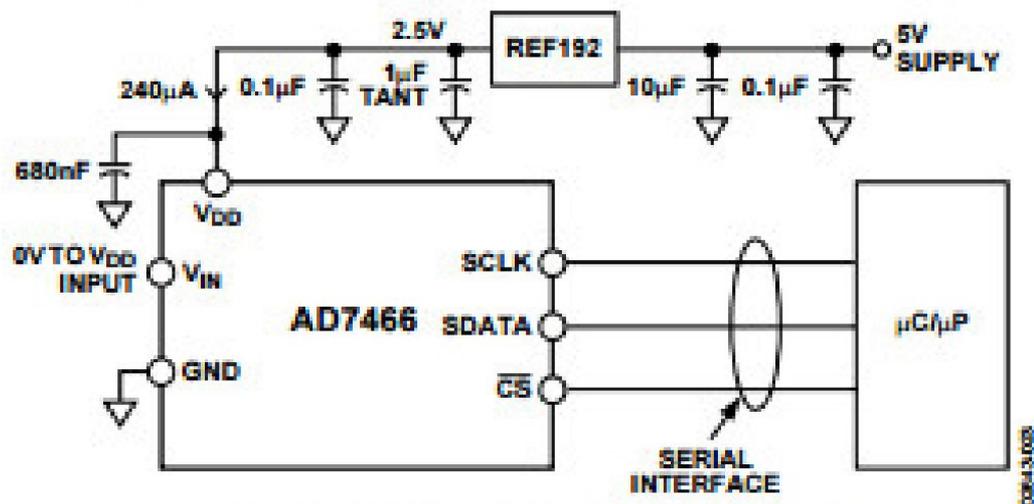
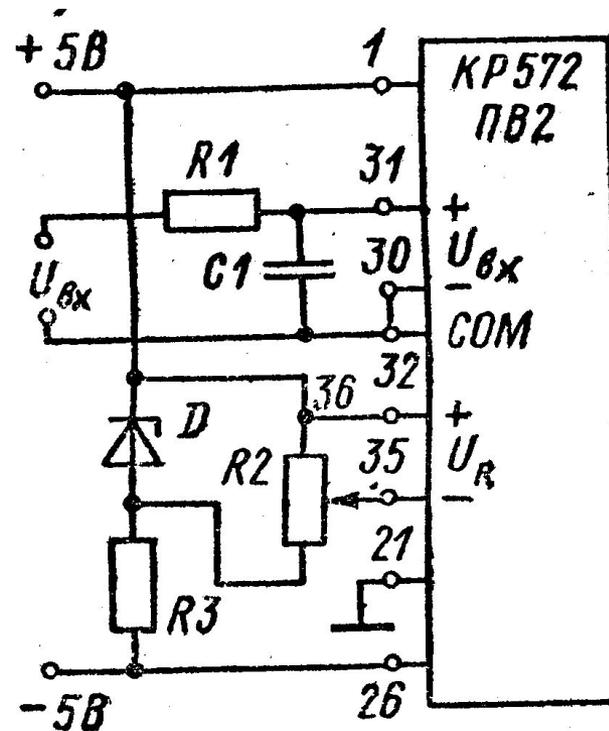


Figure 22. REF192 as Power Supply to AD7466

# ПРОСТЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ

Во входных цепях устройств  
полезно ставить простые  
сглаживающие цепочки  $RC$ .  
На рисунке справа  
(Гутников 1988, с. 260)  
это цепочка  $R1C1$ .



# РАЗМЕЩЕНИЕ ФИЛЬТРОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ

- Фильтр, размещённый близко к входу канала, облегчает работу последующих узлов, так как устраняемая им помеха может «забивать» диапазон преобразования этих узлов.
- Фильтр, размещенный ближе к концу канала, устраняет не только помехи, содержащиеся во входном сигнале, но и шумы предшествующих узлов.

# ВЫБОР ТИПА ФИЛЬТРА ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ПОМЕХ

Любой фильтр, подавляя помеху, вместе с тем искажает полезный сигнал.

- Наименьшие искажения *спектра* полезного сигнала обеспечивает **фильтр Баттерворта**, поскольку он имеет *максимально плоскую амплитудную характеристику* в полосе пропускания.
- Наименьшие искажения *формы* негармонического (например, импульсного) сигнала обеспечивает **фильтр Бесселя нижних частот**, поскольку он имеет *максимально линейную фазовую характеристику* в полосе пропускания.
- Фильтры Бесселя верхних частот (и других видов) не имеют этого полезного свойства, и их применение не имеет смысла.

# ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФИЛЬТРОВ

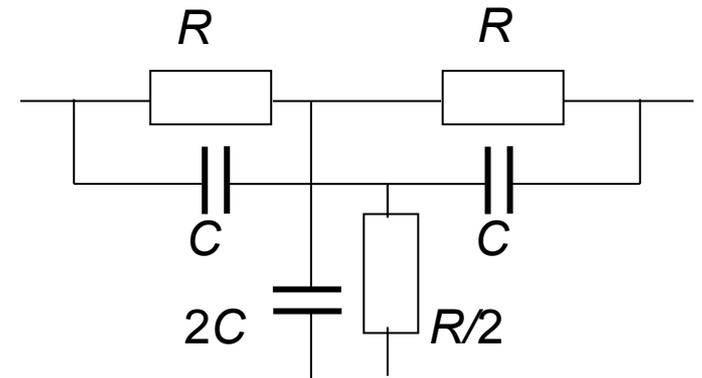
- Для измерительных каналов часто предпочитают активные фильтры на основе операционных усилителей.
- Могут использоваться готовые микросхемы фильтров (см. слайды 82–84 главы 5).
- Фильтрация в микроконтроллере может быть реализована с использованием весовых функций, рассмотренных в книге: Гутников 1990. Весовые функции могут использоваться и вне микроконтроллеров.

# ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫХ ПОМЕХ

Частотная характеристика двойного Т-образного моста имеет нуль на частоте

$$f = 1/(2\pi RC).$$

Этот нуль можно совместить с частотой сети.



Имеется монография: *Андреев Ю.А., Кобак В.О. Двойные Т-образные мосты в избирательных усилителях. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 104 с.*

Лучшее подавление сетевой помехи со всеми её гармониками обеспечивают АЦП двухтактного интегрирования (особенно при наличии ФАПЧ), а также АЦП с  $\Sigma\Delta$ -модуляторами при определённых частотах обновления. Разработаны специальные весовые функции для подавления сетевой помехи.

# ПРИМЕРЫ ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОВ

- При анализе энцефалограмм выделяют ряд характерных ритмов. Согласно одному из специальных источников:
  - дельта-ритм – от 1,5 до 3,9 Гц;
  - тета-ритм – от 4,0 до 7,9 Гц;
  - альфа-ритм – от 8,0 до 12,9 Гц;
  - бета-ритм – от 13,0 до 30,0 Гц.

Распределение мощности этих ритмов по поверхности черепа даёт наглядную картину работы мозга.

- При измерении акустических шумов и случайных вибраций, а также в некоторых аудиометрических методиках используют наборы *третьоктавных фильтров*, т. е. полосовых фильтров с полосами пропускания, занимающими по 1/3 октавы.

**В ГОСТ 12997–84** приведен перечень третьоктавных частотных поддиапазонов со следующими центральными частотами:  
10; 13; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200;  
250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000 Гц.

# КОРРЕКЦИЯ АДДИТИВНОЙ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ

- Уже было сказано (см. слайд 7 главы 5), что существуют два основных метода коррекции: метод вспомогательных измерений и метод образцовых сигналов.
- Для реализации метода вспомогательных измерений нужно знать функции влияния (см. ГОСТ 8.009–84) и иметь возможность организовать вспомогательные каналы для измерения влияющих величин – обычно температуры. Особая влияющая величина – напряжение питания.
- Для реализации метода образцовых сигналов нужно иметь возможность подачи этих сигналов (обычно нулевого и предельного) на вход измерительного канала.
- Возможно использование встроенных в микросхемы АЦП режимов коррекции (см. слайды 9 и 10<sub>3</sub> главы 5).

# КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОТ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ: ЛОГОМЕТРИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ

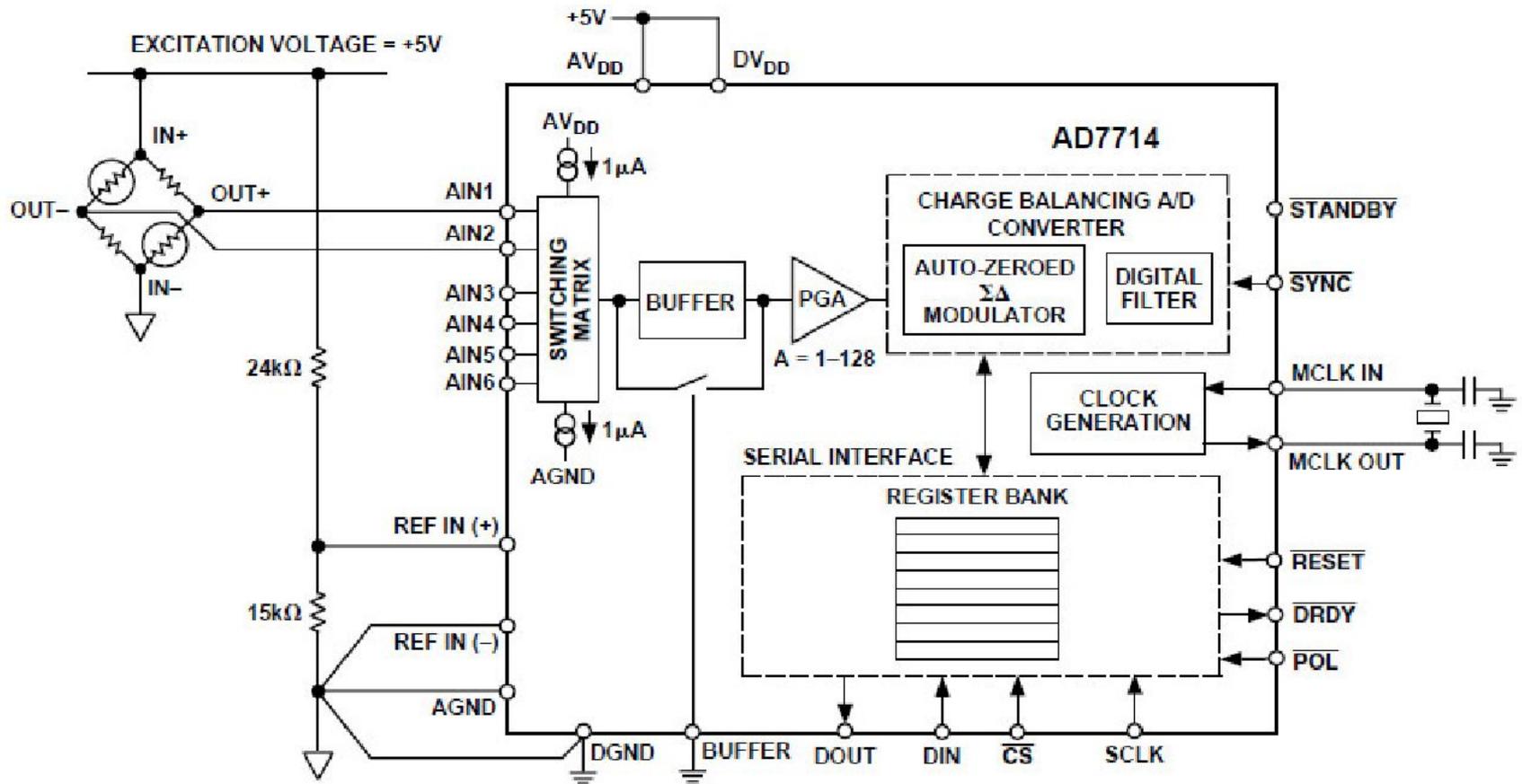


Figure 12. Pressure Measurement Using the AD7714

**Вариант с питанием датчика заданным напряжением**

# РАСЧЁТ СХЕМЫ ПРЕДЫДУЩЕГО СЛАЙДА

## APPLICATIONS

The on-chip PGA allows the AD7714 to handle an analog input voltage range as low as 10 mV full-scale with  $V_{REF} = +1.25$  V.

The differential inputs of the part allow this analog input range to have an absolute value anywhere between AGND and  $AV_{DD}$  when the part is operated in unbuffered mode. It allows the user to connect the transducer directly to the input of the AD7714.

The programmable gain front end on the AD7714 allows the part to handle unipolar analog input ranges from 0 mV to +20 mV to 0 V to +2.5 V and bipolar inputs of  $\pm 20$  mV to  $\pm 2.5$  V. Because the part operates from a single supply these bipolar ranges are with respect to a biased-up differential input.

### Pressure Measurement

One typical application of the AD7714 is pressure measurement. Figure 12 shows the AD7714 used with a pressure transducer, the BP01 from Sensym. The pressure transducer is

arranged in a bridge network and gives a differential output voltage between its OUT(+) and OUT(-) terminals. With rated full-scale pressure (in this case 300 mmHg) on the transducer, the differential output voltage is 3 mV/Volt of the input voltage (i.e., the voltage between its IN(+) and IN(-) terminals).

Assuming a 5 V excitation voltage, the full-scale output range from the transducer is 15 mV. The excitation voltage for the bridge is also used to generate the reference voltage for the AD7714. Therefore, variations in the excitation voltage do not introduce errors in the system. Choosing resistor values of 24 k $\Omega$  and 15 k $\Omega$  as per the diagram give a 1.92 V reference voltage for the AD7714 when the excitation voltage is 5 V.

Using the part with a programmed gain of 128 results in the full scale input span of the AD7714 being 15 mV which corresponds with the output span from the transducer.

# Вариант с питанием датчика заданным током от постороннего источника

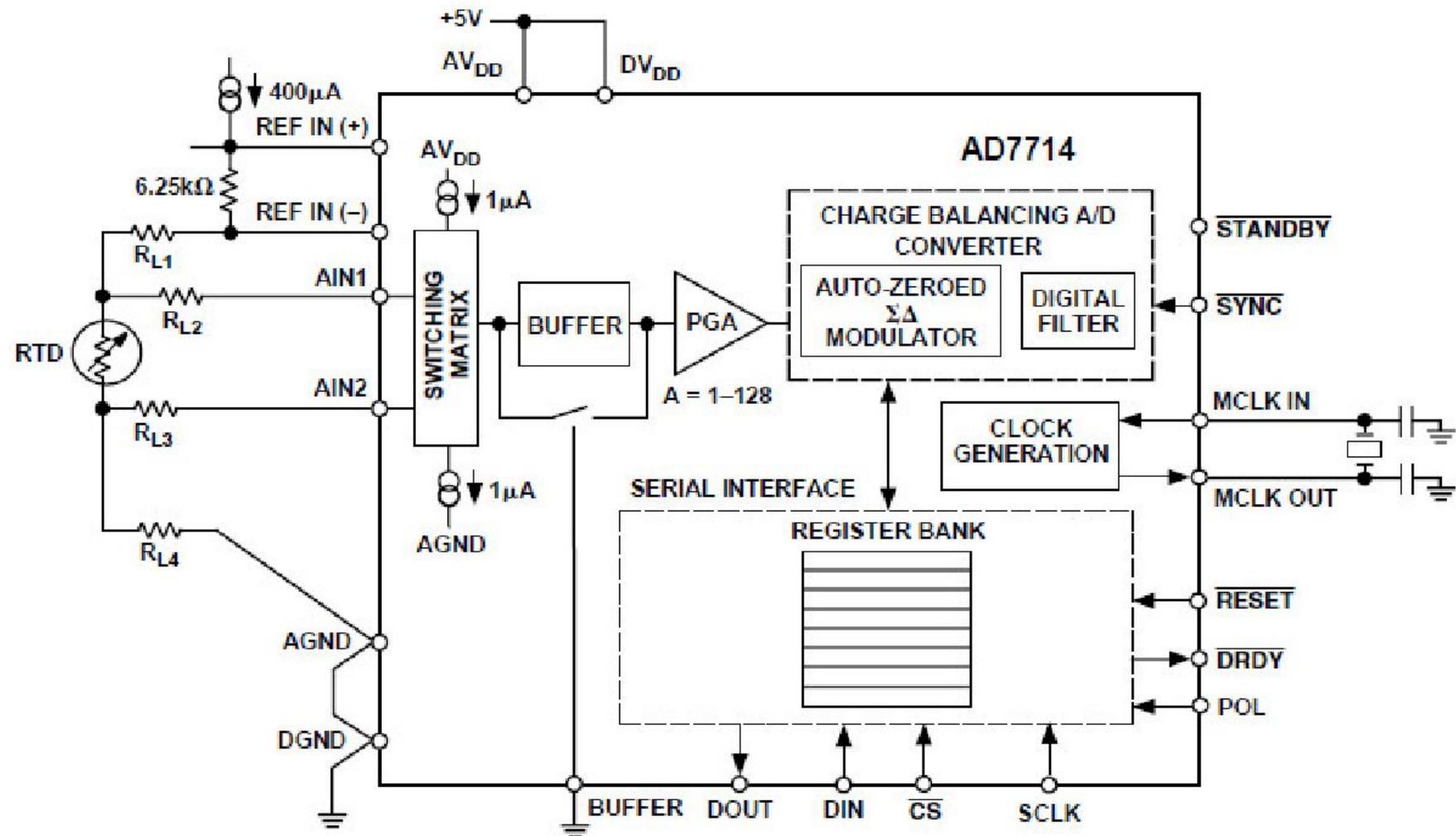


Figure 14. RTD Measurement Using the AD7714

**Вариант с питанием датчика заданным током от встроенного источника (трёхпроводное включение)**

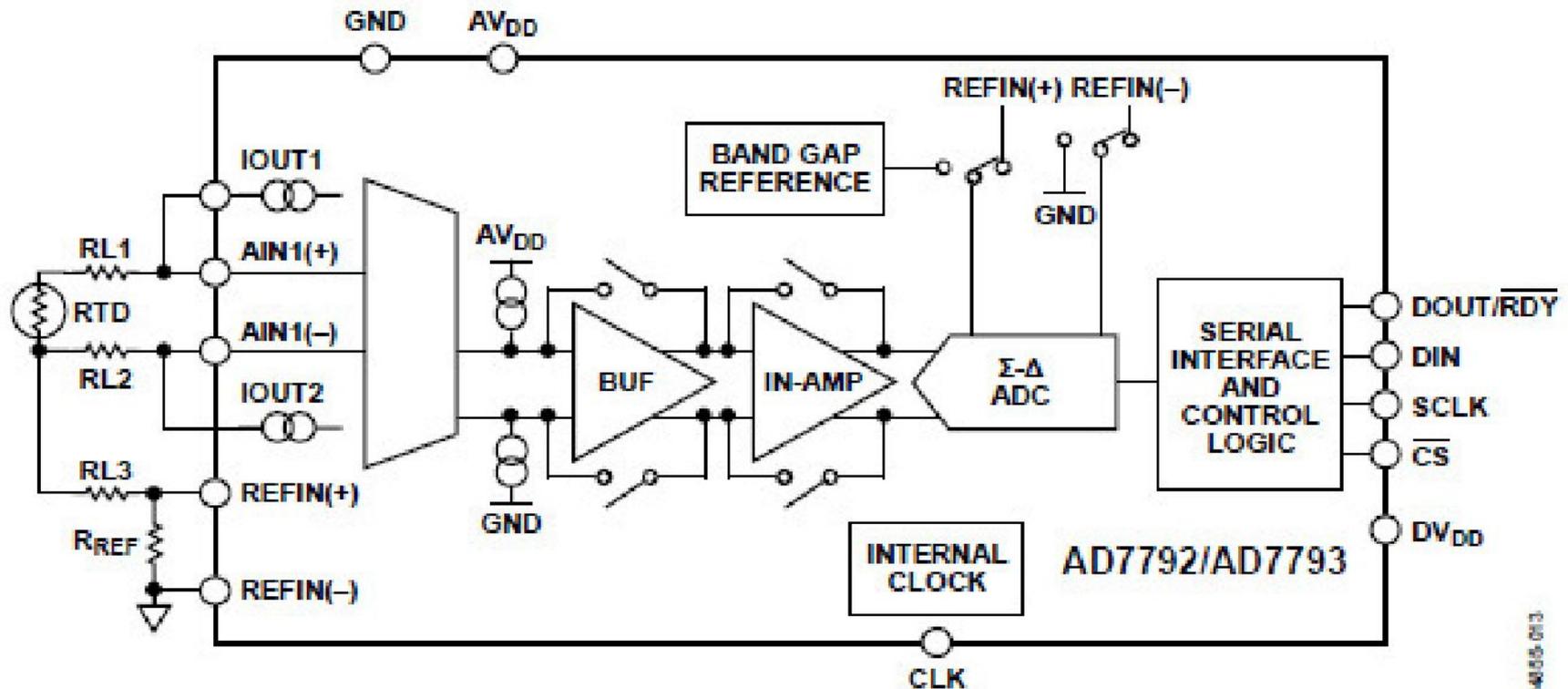
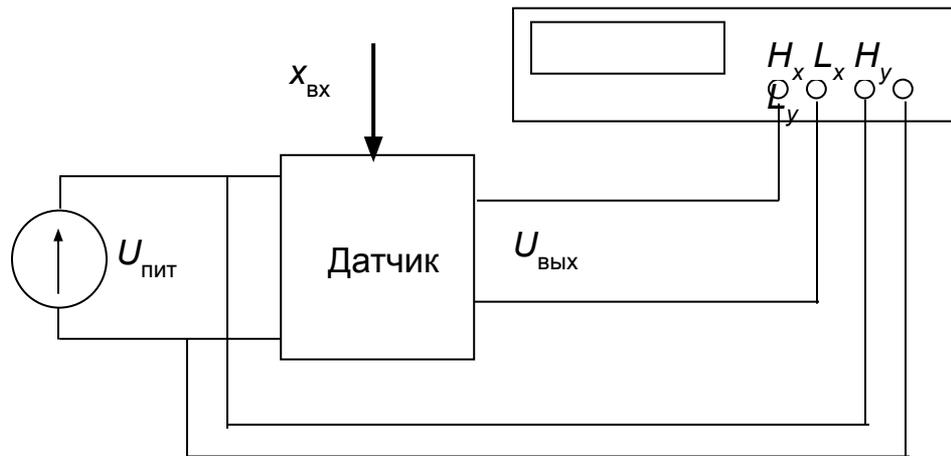


Figure 21. RTD Application Using the AD7792/AD7793

# ЛОГОМЕТРИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА (С РЕЖИМОМ ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ)



Пример такого вольтметра –  
В7-34

Рис. 4.11. Исключение систематической погрешности путем использования логометрического режима цифрового вольтметра

**Рисунок из книги: Кнорринг В.Г., Марамзина М.Г. Метрология, стандартизация, сертификация. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 240 с.**

# ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА

- Термин *линеаризация* имеет различные значения в теории управления и в измерительной технике.
- В теории управления линеаризацией называют *мысленное* спрямление характеристик нелинейных звеньев для облегчения расчётов.
- В измерительной технике линеаризацией называют *реальные* операции, направленные на получение линейной характеристики измерительного канала при наличии в нём нелинейных звеньев (обычно это датчик).
- К задачам линеаризации близки задачи получения цифрового отсчёта заданной (например, при отсчёте в децибелах – логарифмической) функции измеряемой величины.

# КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ЛИНЕАРИЗАЦИИ

Два классификационных признака:

- Сечение канала, в котором выполняется линеаризация (аналоговая часть, АЦП, микроконтроллер).
- Принцип линеаризации (единой функцией, кусочно-линейно или в общем случае кусочно-функционально, по таблице).

Линеаризация по таблице возможна только в микроконтроллере.

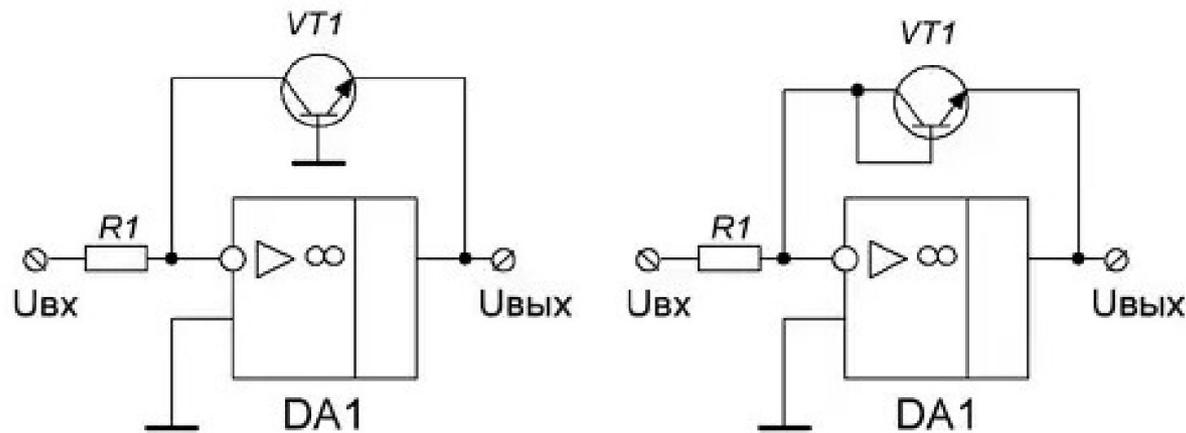
Линеаризация единой функцией и кусочно-линейная линеаризация возможны в любом сечении канала, но линеаризация в аналоговой части обычно вносит бóльшие погрешности.

# О ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗНЫХ СПОСОБОВ

- Линеаризация необязательно должна выполняться в одном сечении канала и на основе одного принципа.
- Может быть целесообразно, например, в аналоговой части канала или в АЦП выполнить *приближенную линеаризацию* единой функцией (что обычно проще), а остаточную погрешность устранить в микроконтроллере.

# АНАЛОГОВАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ЕДИНОЙ ФУНКЦИЕЙ

Пример – логарифмические усилители  
(рисунок из Интернета, DA1 – операционный  
усилитель)



Схемы логарифмических усилителей с транзистором в цепи обратной связи.

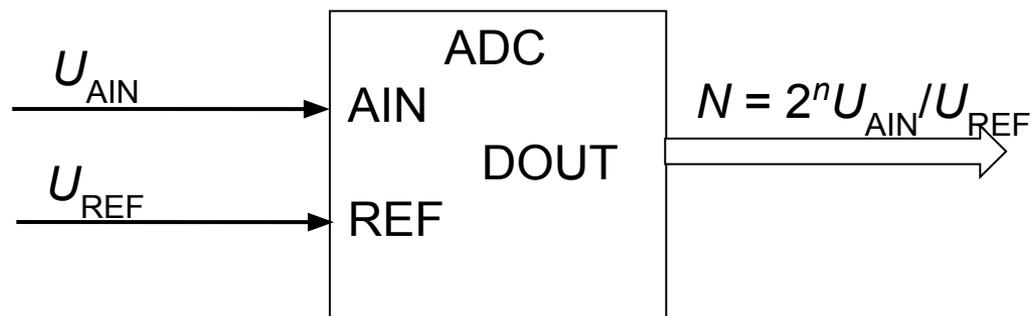
# КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ АНАЛОГОВАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ

Пример – диодные функциональные преобразователи, которым посвящена, в частности, книга:  
*Смолов В.Б. Диодные функциональные преобразователи. – Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1967*  
[Библиотека по автоматике, вып. 259]



# ЛИНЕАРИЗАЦИЯ В АЦП ЕДИНОЙ ФУНКЦИЕЙ

- Линеаризация, требующая специальной разработки (пример – время-импульсный АЦП с экспоненциальной развёрткой)
- **Линеаризация дробно-линейной функцией** с использованием серийно выпускаемых микросхем, допускающих изменение опорного напряжения:



Если  $U_{AIN} = aU_{датч} + bU_{ион}$ ;  $U_{REF} = cU_{датч} + dU_{ион}$ , то

$$N = 2^n (aU_{датч} + bU_{ион}) / (cU_{датч} + dU_{ион}).$$

Меняя коэффициенты, можем получить функции от линейной до гиперболической.

# ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ДРОБНО-ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИЕЙ В ЦИФРОВОМ ТЕРМОМЕТРЕ ФОГЕЛЬСОНА

АГРОФИЗИЧЕСКИЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ФОГЕЛЬСОН  
Игорь Борисович

ТРАНЗИСТОРНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ  
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В АГРОМОНИТОРИНГЕ

Специальность: 06.01.14 - агрофизика.

ДИССЕРТАЦИЯ  
в виде научного доклада.  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

С - Петербург, 1998г.

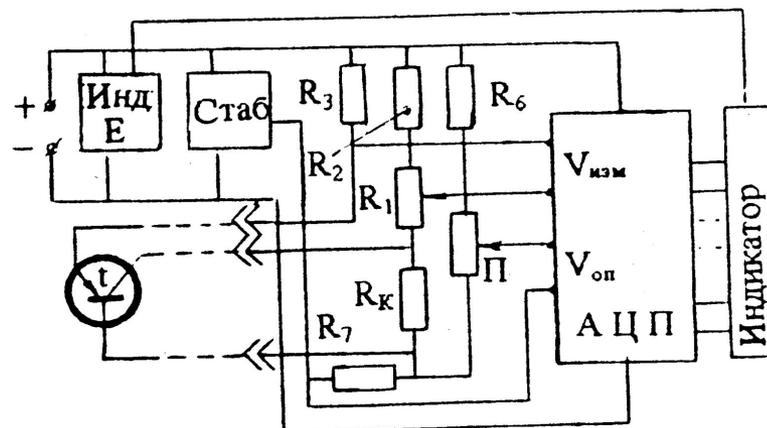


Рис. 20. Схема моста с линеаризацией по опорному входу АЦП.

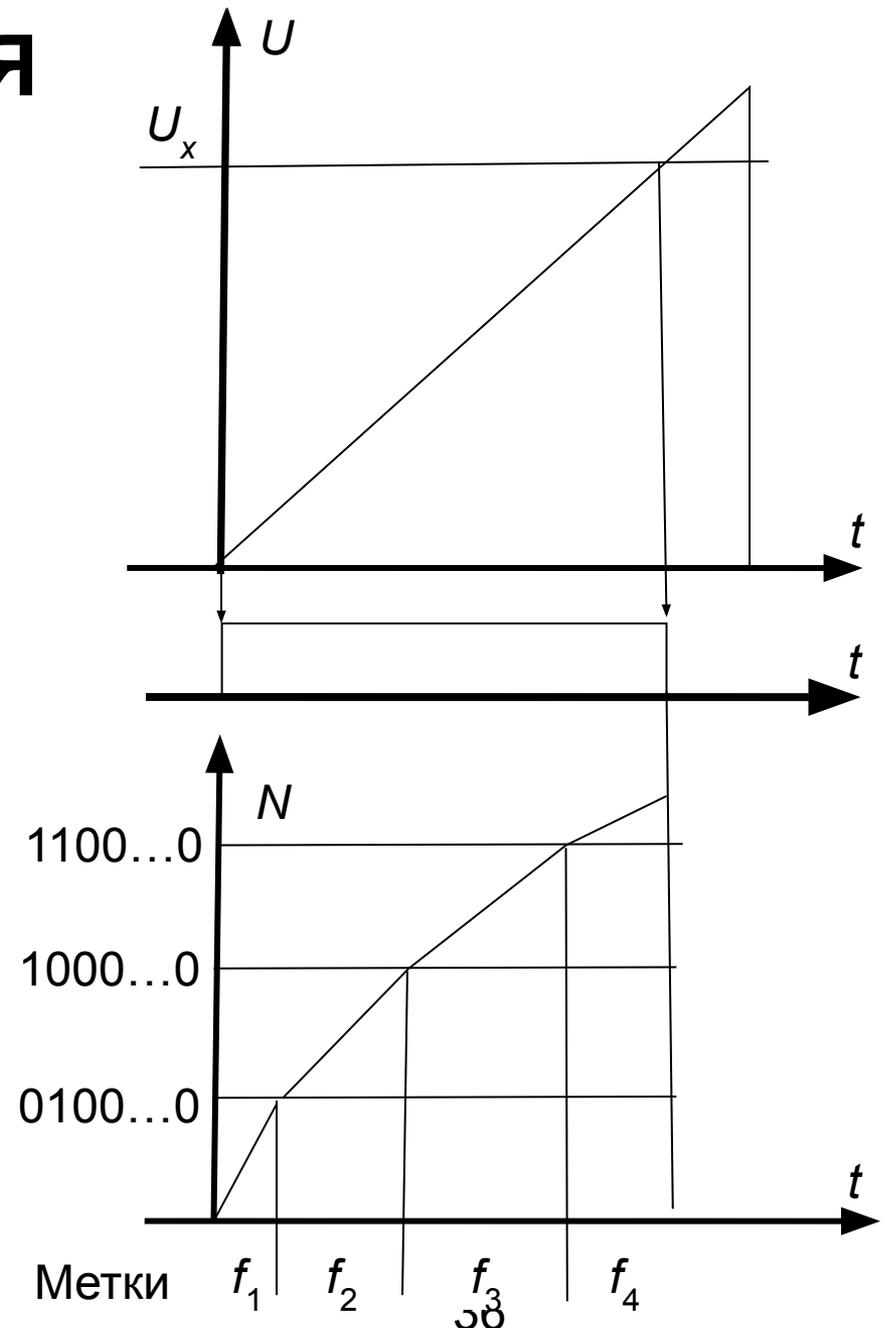
48

Использована микросхема АЦП 572ПВ5, прямо сопрягающаяся с жидкокристаллическими семисегментными индикаторами.

35

# КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ В АЦП

Этот метод удобно реализовать в специально разработываемых время-импульсных АЦП. Старшие разряды выходного счётчика определяют участок аппроксимации. Каждому участку соответствует своя частота меток. Менять наклон развёртки по участкам менее удобно.



# КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ В ЦИФРОВОМ ТЕРМОМЕТРЕ DS1820

**DS1820**  
1-Wire™ Digital Thermometer

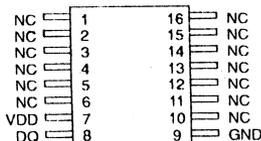
DS1820

TEMPERATURE MEASURING CIRCUITRY Figure 4

## PIN ASSIGNMENT

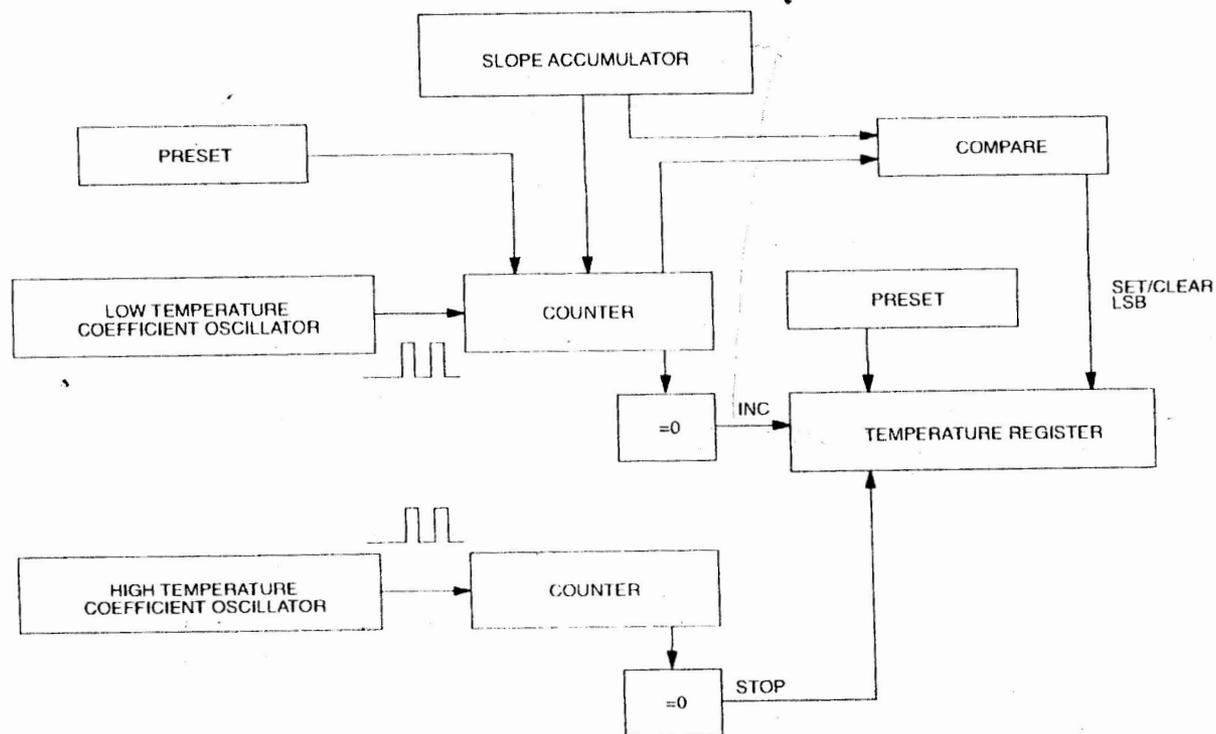


BOTTOM VIEW



DS1820  
PR35 PACKAGE  
See Mech. Drawings  
Section

DS1820S  
16-PIN SSOP  
See Mech. Drawings  
Section



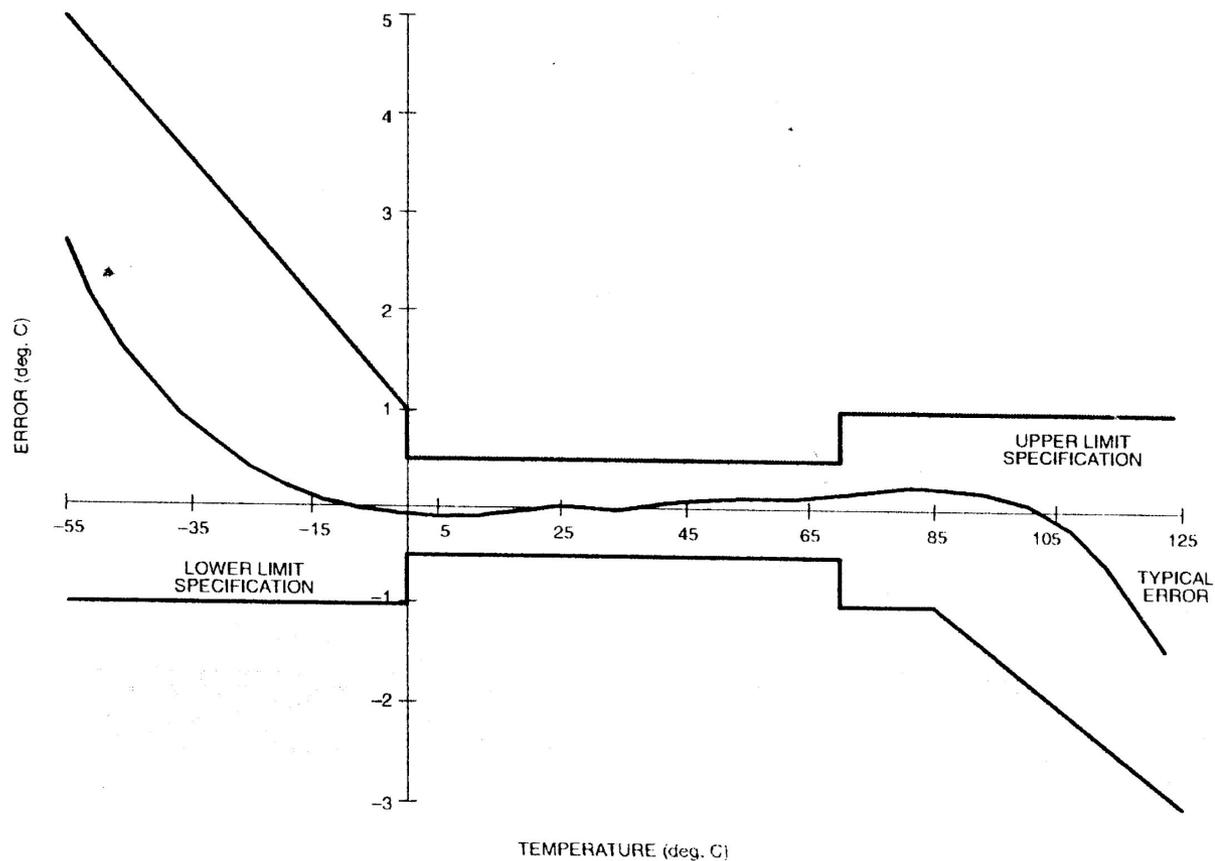
*В описаниях новых версий микросхемы рисунка  
со структурной схемой нет*

# РЕЗУЛЬТАТ ЛИНЕАРИЗАЦИИ В ЦИФРОВОМ ТЕРМОМЕТРЕ DS1820

DS1820

## TYPICAL PERFORMANCE CURVE

DS1820 DIGITAL THERMOMETER AND THERMOSTAT  
TEMPERATURE READING ERROR



# ЛИНЕАРИЗАЦИЯ В МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ

- При небольшом числе отсчётов (как в бытовом термометре) возможно составить таблицу соответствия отсчётов измеряемой величины (прямо в кодах ASCII) кодовым комбинациям АЦП.
- Если отсчётов много, разумнее линеаризировать единой функцией (например, полиномом) или кусочно-линейно.
- Если в микроконтроллере выполняется и фильтрация помехи, действующей *на входе* нелинейного датчика, следует сначала линеаризовать, потом фильтровать.
- Если помеха действует *на выходе* нелинейного датчика, следует сначала фильтровать, потом линеаризовать. ***Погрешность, появляющаяся последней, должна устраняться первой.***

# РЕЗУЛЬТАТ НЕПРАВИЛЬНОГО ПОРЯДКА ДЕЙСТВИЙ (УПРОЩЁННЫЙ ПРИМЕР)

- Пусть нелинейная характеристика датчика описывается полиномом второй степени  $u = ax - bx^2$ , сигнал содержит постоянную составляющую  $x_0$  и синусоидальную помеху  $X_m \sin \omega t$ , а фильтрация заключается в усреднении, *выполняемом до линеаризации*.
- После подстановки  $x = x_0 + X_m \sin \omega t$  в формулу для  $u$  получим члены с  $X_m \sin \omega t$ , имеющие нулевое среднее значение, и член  $-bX_m^2 \sin^2 \omega t = -bX_m^2 (0,5 - 0,5 \sin 2\omega t)$ , среднее значение которого равно  $-0,5bX_m^2$ . Это есть «выпрямленная» помеха, которую теперь стало невозможным отличить от сигнала.

# ПРИМЕР НАХОЖДЕНИЯ ЗАПАСА РАЗРЯДНОСТИ АЦП ДЛЯ РАСЧЁТНОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ)

*По книге: Кнорринг 2003, упражнение 2.6.1*

Характеристику датчика электромагнитного толщиномера неферромагнитных покрытий в первом приближении можно описать гиперболой.  $u(\delta) = U_0 \delta_0 / (\delta + \delta_0)$ , где  $u(\delta)$  – выходное напряжение датчика,  $\delta$  – измеряемая толщина;  $U_0$  и  $\delta_0$  – константы. Пусть измеряемая толщина может изменяться в пределах от нуля до  $9\delta_0$ , а после цифровой линейаризации должен быть обеспечен отсчет не менее, чем 1000 градаций измеряемой толщины  $\delta$  (т.е. двоичная разрядность *отсчёта* должна составить 10). Найдём необходимую для этого разрядность АЦП.

# ПРИМЕР НАХОЖДЕНИЯ ЗАПАСА РАЗРЯДНОСТИ АЦП ДЛЯ РАСЧЁТНОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ (РЕШЕНИЕ)

*По книге: Кнорринг 2003, упражнение 2.6.1*

Из формулы для  $u(\delta)$  видно, что при  $\delta = 0$  напряжение датчика составляет  $U_0$ , а при максимальном значении измеряемой толщины  $9\delta_0$  оно падает до  $0,1U_0$ . При разрядности АЦП  $n$  битов квант напряжения составит  $q = U_0/2^n$ . Этот размер кванта должен обеспечить необходимое различение по толщине *на участке характеристики с наименьшим значением модуля производной*

$$|du(\delta)/d\delta| = U_0\delta_0/(\delta + \delta_0)^2.$$

Разделив квант напряжения на наименьший модуль производной, равный  $U_0/(100\delta_0)$ , получаем квант толщины, который по условию должен составить не более, чем  $9\delta_0/1000$ . Таким образом, имеем неравенство:  $100\delta_0/2^n \leq 9\delta_0/1000$ , или  $2^n \geq 100000/9 \approx \approx 11111$ . Ближайшее целое  $n$ , удовлетворяющее этому неравенству, равно 14, при этом  $2^n = 16384$ .

# ОБСУЖДЕНИЕ РАСЧЁТНОГО ЗАПАСА ПО РАЗРЯДНОСТИ АЦП

- В рассмотренном примере запас по разрядности (14 двоичных разрядов вместо 10) велик потому, что был рассмотрен случай сильной нелинейности датчика.
- Но запас по разрядности нужен и при более простых вычислительных операциях, даже при умножении результата преобразования на коэффициент, близкий к единице.

# ОЦЕНИВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА

- Метрологические характеристики спроектированного изделия оцениваются с учётом всего материала главы 5.
- Инструментальные составляющие погрешности оцениваются на основании паспортных параметров покупных компонентов *с обязательным учётом степени влияния этих параметров на результирующую погрешность.*
- Составляющие погрешности методического происхождения оцениваются с помощью анализа принятого метода измерения.
- Раздельно оцениваются аддитивная и мультипликативная составляющие основной погрешности, а также температурные дрейфы и при необходимости помехоустойчивость.

# ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

- Предел допускаемой основной погрешности в большинстве случаев выражается двучленной формулой по ГОСТ 8.401–80.
- Погрешность измерения температуры рекомендуется выражать как абсолютную.
- При указании погрешности измерения относительной влажности (RH) необходимо оговорить, имеется ли в виду «абсолютная» погрешность в процентах RH, или «относительная», отнесённая к текущей RH.
- Для многодиапазонного устройства погрешность для каждого диапазона может указываться отдельно.
- Для многоканального устройства с различными в каждом канале измеряемыми величинами (например, температура, влажность и давление) погрешность обязательно указывается отдельно для каждого канала.

# О РАСЧЁТНОМ ОЦЕНИВАНИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

- Расчётное оценивание погрешностей при проектировании является предварительным. Окончательно метрологические характеристики изделия оцениваются экспериментально при его метрологической аттестации.
- Разработчик изделия *обязан* обеспечить возможность его метрологической аттестации – указать или в необходимых случаях разработать необходимые для этого средства.

***Проект должен заканчиваться  
заключением о выполнении всех  
пунктов развёрнутого  
технического задания.***