

Представитель в Санкт-Петербурге
ЦУКАНОВ Ю.В.
Tel.: 2 5 2 - 0 1 - 4 0
e-mail: inf @ autex.spb.ru



РАЗДЕЛ 2

МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

РАЗДЕЛ 2: МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

Уолт Кестер

- Конфигурации мостов
- Усиление и линейризация выходных сигналов мостов
- Управление мостами

Конфигурации мостов

Резистивные элементы являются одним из наиболее распространенных типов датчиков. Они недороги и относительно легко соединяются с нормирующими цепями. Резистивные элементы можно сделать чувствительными к температуре, деформации (под действием силы или при изгибе) и к потоку света. Можно измерять многие комплексные физические процессы, используя эти элементы. Например, поток жидкостей или масс (измеряя разность температур двух калиброванных резисторов).

На Рис.2.1 показаны различные резистивные датчики в диапазоне от 100Ω до нескольких десятков $K\Omega$ в зависимости от конструкции датчиков и измеряемой среды.

◆ Тензометрические датчики	$120\Omega, 350\Omega, 3500\Omega$
◆ Динамометры	$350\Omega - 3500\Omega$
◆ Датчики давления	$350\Omega - 3500\Omega$
◆ Датчики относительной влажности	$100 K\Omega - 10 M\Omega$
◆ Термометры сопротивления (ТС)	$100\Omega, 1000\Omega$
◆ Термисторы	$100\Omega - 10 M\Omega$

Рис 2.1. Сопротивление популярных резистивных датчиков.

Резистивные датчики, такие как ТС и тензометрические датчики дают малый процент изменения сопротивления в ответ на изменение физической переменной. Так температурный коэффициент платинового ТС составляет $TKSP=0.385\%/^{\circ}C$.

Тензометрические датчики даже бросают вызов системе измерения, поскольку изменение сопротивления по всему рабочему диапазону может быть менее 1% от номинальной величины. Таким образом, при использовании резистивных датчиков особенно важно точно измерять малые изменения сопротивления.

Метод измерения сопротивления, показанный на Рис.2.2, состоит в пропускании постоянного тока через резистивный датчик и измерении падения напряжения на нем.

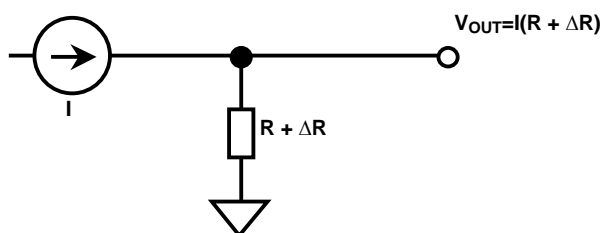


Рис.2.2. Использование источника постоянного тока для прямого измерения сопротивления.

Здесь требуется точное удержание тока возбуждения и точное измерение выходного напряжения. Вдобавок, мощность, рассеиваемая на резистивном датчике должна быть малой во избежание ошибок, связанных с саморазогреванием (в соответствии с ТУ производителя). Поэтому, ток возбуждения должен быть малым.

Весьма притягательной альтернативой для точного измерения малых изменений сопротивления являются мосты Уитстона (на самом деле, изобретенные С.М. Кристи в 1883г). На Рис.2.3 приведена схема измерительного моста.

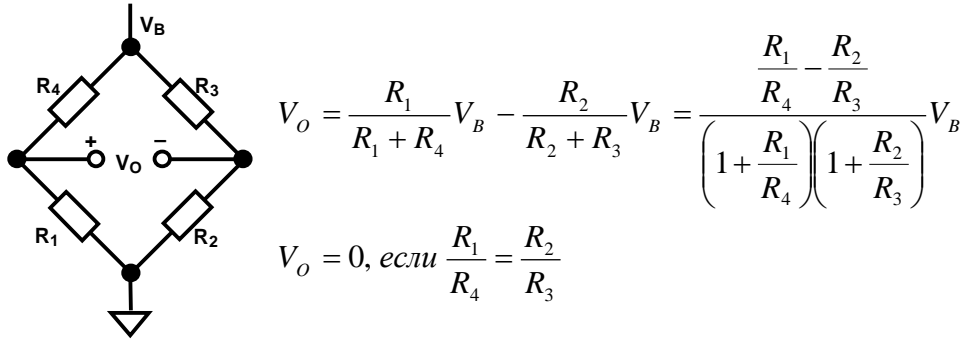


Рис.2.3. Мост Уитстона.

Мост находится в *нулевом* (сбалансированном) состоянии при $R_1/R_4 = R_2/R_3$ вне зависимости от способа его возбуждения (постоянным либо переменным током), величины возбуждения или способа считывания выходного сигнала (ток или напряжение), импеданса схемы измерения. Если зафиксировать $R_2/R_3 = K$, а величину R_1 необходимо определить то, введя мост в *нулевое* состояние с помощью градуированного потенциометра R_4 , можно рассчитать $R_1 = K * R_4$.

Нулевые измерения используются в системах с электромеханическими элементами.

В большинстве приложений с использованием мостовых датчиков величина отклонения сопротивления одного или нескольких сопротивлений плеч моста измеряется через величину изменения измеряемого параметра. Например, измеряя напряжение диагонали моста, судят об изменении величины составляющих его сопротивлений. Изменение выходного напряжения моста весьма мало (десятки милливольт) даже при значительных возбуждающих напряжениях ($V_B = 10V$, являющееся типовым для элементов нагрузки - динамометров). На Рис.2.4 показаны различные конфигурации измерительных мостов и приведены основные соотношения по выходу и их нелинейности. Следует отметить, что поскольку выход моста пропорционален возбуждению V_B , точность измерения выхода не может быть выше точности поддержания возбуждения.

Чувствительность моста - отношение максимально ожидаемого изменения выходного напряжения (выхода) к напряжению возбуждения (возбуждению). Так, если максимальный выход составляет 10 мВ, а возбуждение 10 В, то чувствительность равна 1 мВ/В.

Четверть мостовая конфигурация моста (с *одним чувствительным элементом*) используется при измерении температуры и деформации. Как видно из формул Рис.2.4, связь между выходом моста и изменением величины чувствительного резистора ΔR - не линейна. Например, при $R=100\Omega$ и $\Delta R=0.1\Omega$ выход моста составляет 2.49875 мВ для $V_B = 10V$. Ошибка составляет 2.50000 мВ - 2.49875 мВ = 0.00125 мВ. Относительная нелинейность, как процент от полной шкалы составит $(0.00125 \text{ мВ} / 2.5 \text{ мВ}) * 100\% = 0.05\%$.

Относительная нелинейность для четверть мостовой конфигурации:

$$\sim (\% \text{ изменения сопротивления}) / 2$$

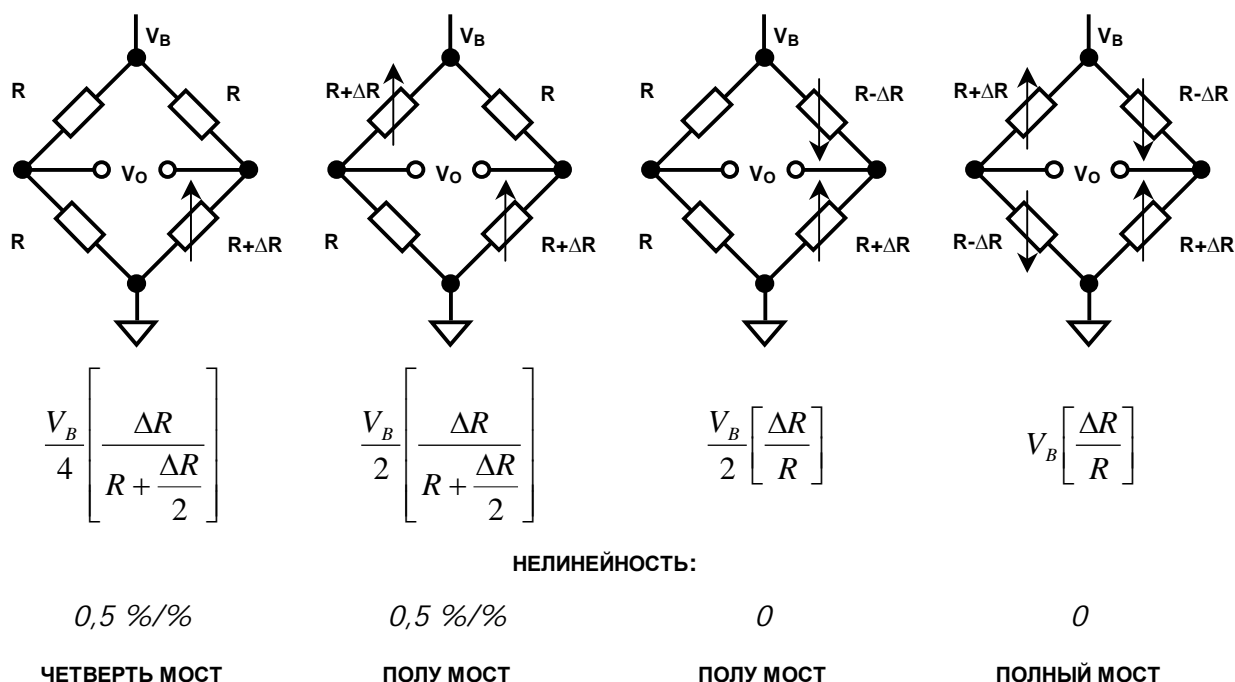


Рис.2.4. Выходное напряжение и его нелинейность для различных конфигураций мостов при возбуждении постоянным напряжением.

Следует особо отметить, что данная нелинейность относится к собственно измерительному мосту и не имеет никакого отношения к нелинейности чувствительного элемента. На практике, большинство чувствительных элементов обладает собственной нелинейностью, которую следует учитывать в конечном результате.

Вследствие того, что нелинейность моста описывается аналитически, достаточно просто учесть ее при цифровой обработке.

Полумостовая конфигурация может быть представлена в двух видах:

Первый случай:

Когда оба чувствительных элемента изменяются в одну сторону и монтируются рядом на одной оси. В этом случае нелинейность точно такая же, как при четверть мостовой конфигурации, коэффициент же передачи в два раза выше. Такая конфигурация нашла применение в датчиках давления и расходомерных системах.

Второй случай:

Когда чувствительные элементы изменяются в противоположные стороны и монтируются, например, в случае датчика деформации, на одной оси, но с разных сторон упругого элемента (сверху и снизу изгибаемой в вертикальной плоскости упругой балки).

Полномостовая конфигурация дает максимальный сигнал на выходе и линейна по своей природе.

Мосты можно также возбуждать постоянным током (а не напряжением, как в предыдущем примере), что представлено на Рис.2.5. Преимущество метода, когда мост располагается далеко от системы регистрации, состоит в отсутствие ошибок измерения из-за наличия сопротивления соединительных проводников. Нелинейность имеется только для случая четверть мостовой конфигурации.

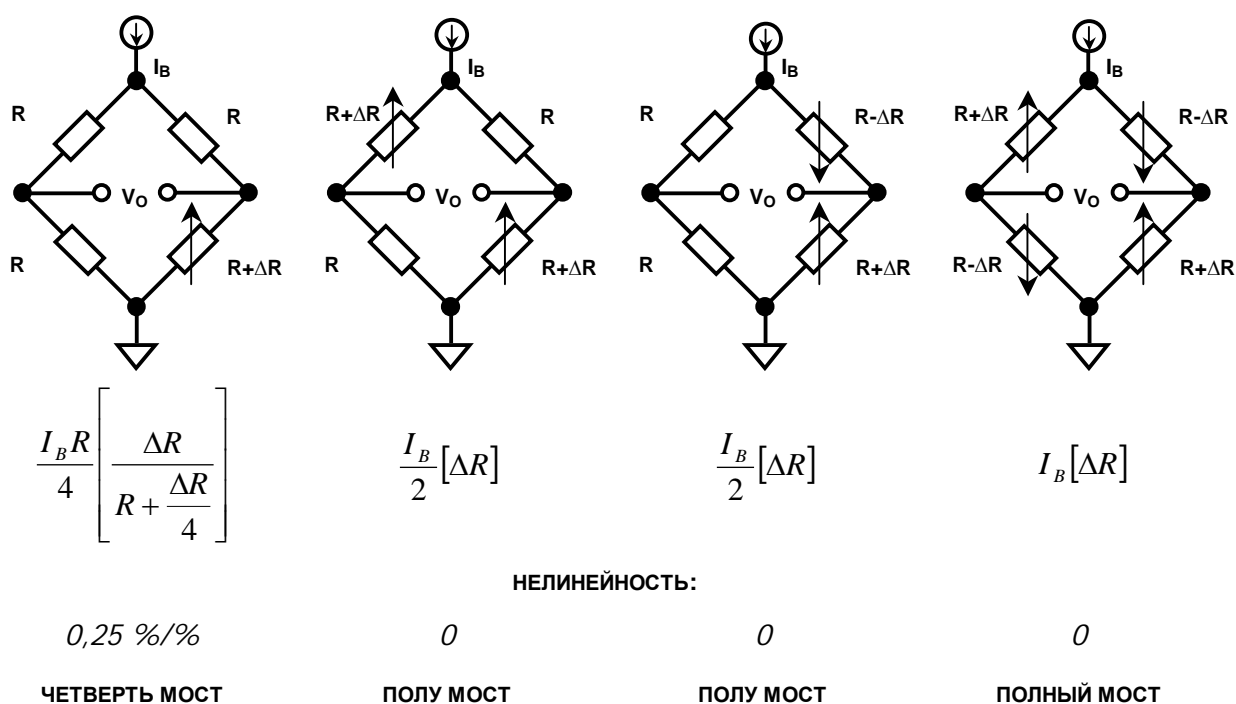


Рис.2.5. Выходное напряжение и его нелинейность для различных конфигураций мостов при возбуждении постоянным током.

- ◆ Выбор конфигурации моста (1,2,4 чувствительных элемента)
- ◆ Выбор источника возбуждения Напряжением или Током
- ◆ Чувствительность моста:
- ◆ Верхний предел выхода / Напряжение Возбуждения
- ◆ Типовые значения от 1 мВ/В до 10 мВ/В
- ◆ Верхний предел выхода: (10 .. 100)мВ
- ◆ Необходимы прецизионные средства Усиления/Нормирования с малыми шумами
- ◆ Могут потребоваться средства Линеаризации
- ◆ Составляет проблему обслуживание дистанционных датчиков

Рис.2.6. Рассмотрение мостовых датчиков.

Усиление и линейризация выходных сигналов мостов

На Рис.2.7 приводится простейшая схема усиления выхода четверть мостового датчика с помощью одного инверсно включенного операционного усилителя (ОУ). Схема имеет низкую точность и разбалансирует мост (со стороны R_F и тока смещения ОУ). Требуется тщательного подбора резисторов R_F для обеспечения высокого коэффициента ослабления синфазной составляющей сигнала (КОСС). Выход не линеен. Основные преимущества - простота (один ОУ) и возможность работы с однополярным источником питания (выходной сигнал ОУ изменяется от $V_S/2$ в обе стороны).

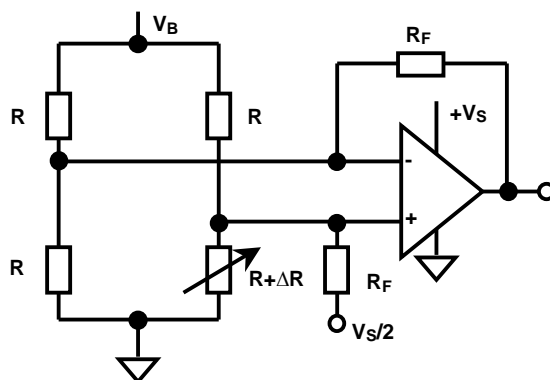


Рис.2.7. Использование единственного операционного усилителя для усиления выхода четверть мостового датчика.

Существенно лучшим методом усиления сигналов с четверть мостового датчика является применение для этой цели инструментального усилителя (ИУ), как показано на Рис.2.8.

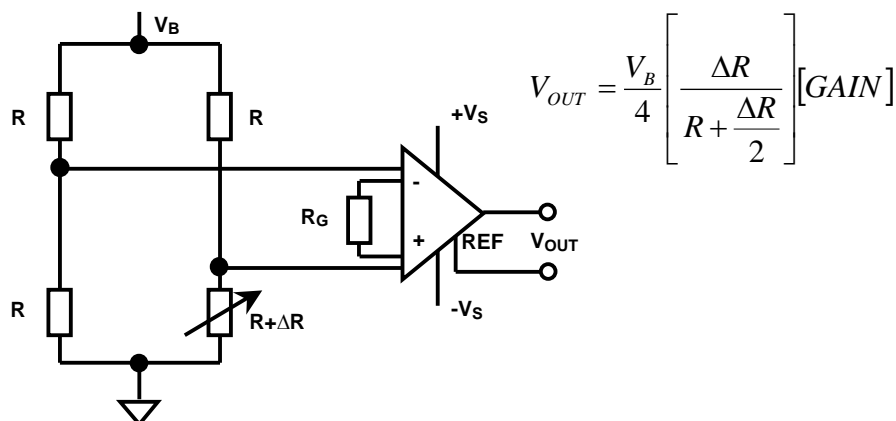


Рис.2.8. Использование инструментального усилителя для усиления выхода четверть мостового датчика.

Основными преимуществами схемы являются перечисленные ниже характеристики. Высокая точность коэффициента преобразования и отсутствие разбалансировки моста. Высокое значение КОСС. Выход - не линеен, но может быть просто линеаризован на цифровом уровне. В качестве инструментальных усилителей можно использовать AD620, AD623 или AD627 с однополярным питанием, при условии соблюдения ограничений на коэффициент передачи и размах выходного сигнала (детально излагается в Разделе 3).

Существуют различные методы линеаризации, однако, важно всегда проводить различие между линейностью моста и линейностью отклика собственно чувствительного

элемента на измеряемый физический процесс. Производители мостовых датчиков рекомендуют различные способы линейризации, в том числе: ограничение размаха изменения величины чувствительного элемента, введение нелинейной поправки в активный элемент моста, использование подстроечных резисторов и т.д.

На Рис.2.9 показан 1/4 мост, в котором операционный усилитель принудительно устанавливает ноль в измерительной диагонали путем подачи компенсирующего напряжения обратной полярности в измеряющее плечо моста. При этом, выход в два раза больше, чем при стандартном включении, и линеен даже при большом изменении величины чувствительного элемента (ΔR).

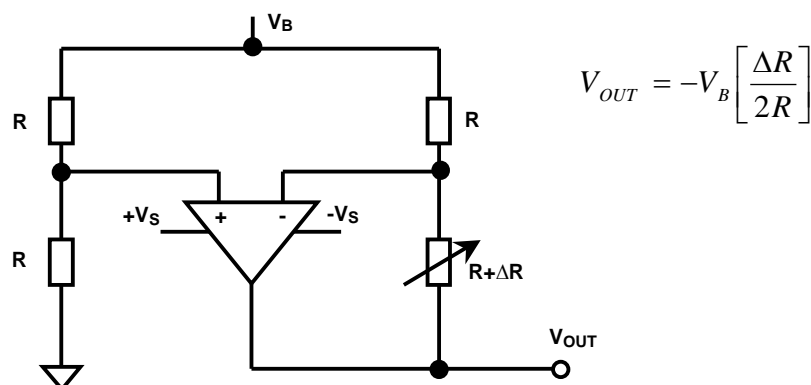


Рис.2.9. Линейризация четверть мостового датчика по Методу 1.

На Рис.2.10 показана линейризация 1/4 моста путем фиксации величины тока через чувствительный элемент с помощью операционного усилителя. Требуется биполярное питание и два операционных усилителя, а также точное согласование резисторов $R1$ и $R2$.

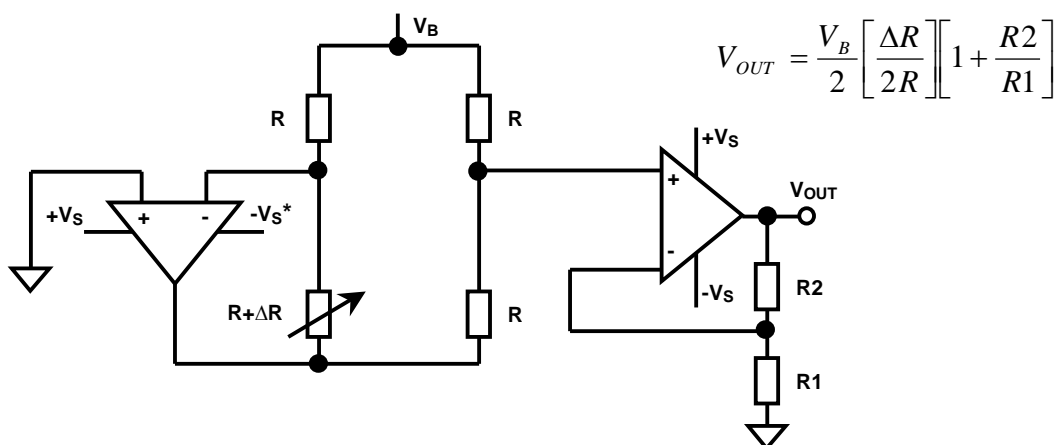


Рис.2.10. Линейризация четверть мостового датчика по Методу 2.

На Рис.2.11 показана линейризация 1/2 моста, подобная приведенной на Рис.2.9, но имеющая в два раза большую чувствительность. Требуется биполярное питание операционного усилителя и может потребоваться дополнительный операционный усилитель для усиления выхода.

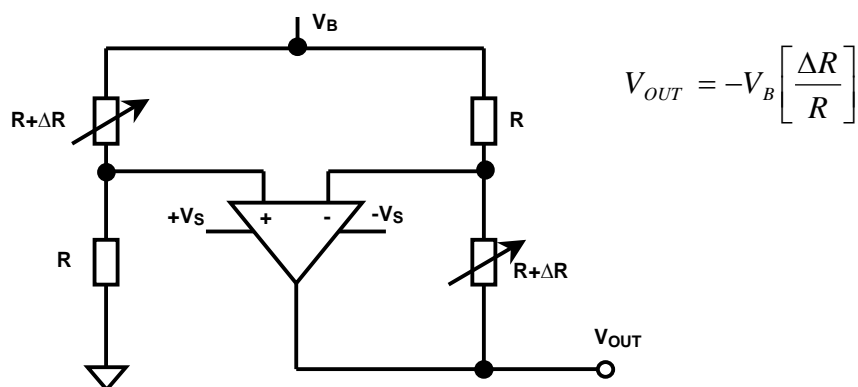


Рис.2.11. Линеаризация полумостового датчика по Методу 1.

На Рис.2.12 показана линеаризация 1/2 моста. Источник опорного напряжения ($V_{ИОН}$), операционный усилитель и измерительный резистор R_s составляют источник тока для возбуждения моста. Дополнительный инструментальный усилитель используется для окончательного усиления выхода.

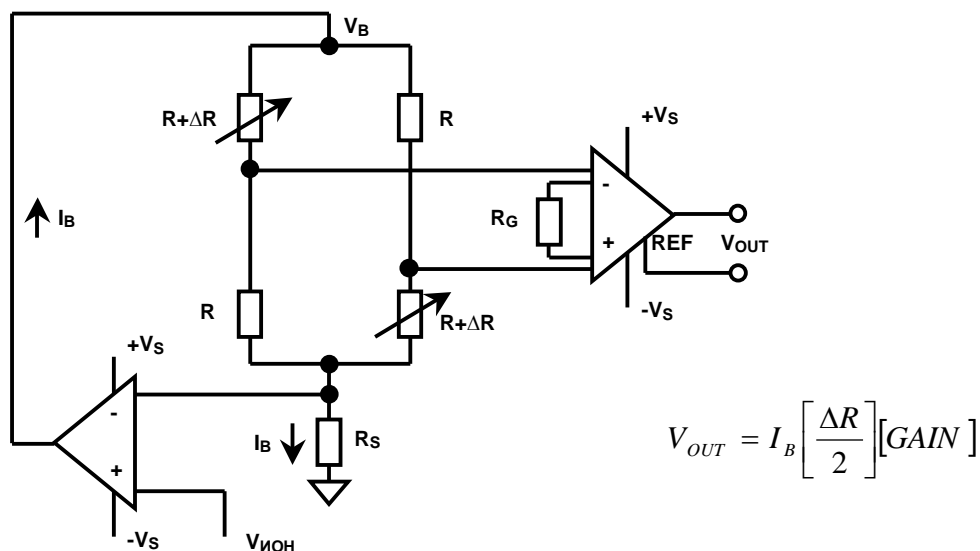


Рис.2.12. Линеаризация полумостового датчика по Методу 2 (Возбуждение полумоста источником тока).

Управление мостами

Наиболее серьезными проблемами при обслуживании дистанционно расположенных мостов являются конечная величина сопротивления соединительных проводов и шумовые наводки. На Рис.2.13 показан 1/4 мостовой 350Ω датчик деформации, подключенный к дистанционному чувствительному элементу скрученной парой медных проводов 30-го калибра длиной 100 фт. При температуре 25°C сопротивление 100 фт. такого провода составляет 10.5Ω . Температурный коэффициент провода $\text{TK}=0.385\%/^\circ\text{C}$. Вычисленная ошибка коэффициента передачи и смещения нуля при увеличении температуры среды на $+10^\circ\text{C}$ при 10V возбуждении составит, соответственно, $\text{КПО} = -0.26\%$ от верхнего предела и $\text{СНО} = +23\%$ от верхнего предела (FS).

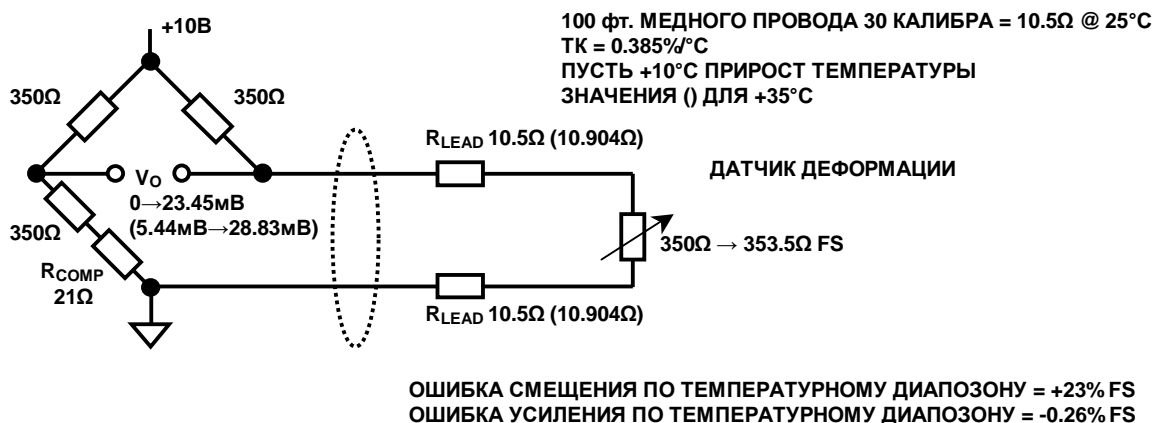


Рис.2.13. Ошибки, обусловленные сопротивлением соединительных проводов резистивного моста.

$R_{\text{COMP}} = 21\Omega$ компенсирует начальное смещение моста, вызываемое наличием соединительных проводов от чувствительного элемента. Цифры, приведенные в скобках «()» соответствуют температуре $+35^\circ\text{C}$. Отметим, что указанные ошибки не включают в себя ошибки, связанные с ТК собственно чувствительного элемента.

3-х проводное подключение чувствительного элемента существенно уменьшает ошибки, как показано на Рис.2.14.

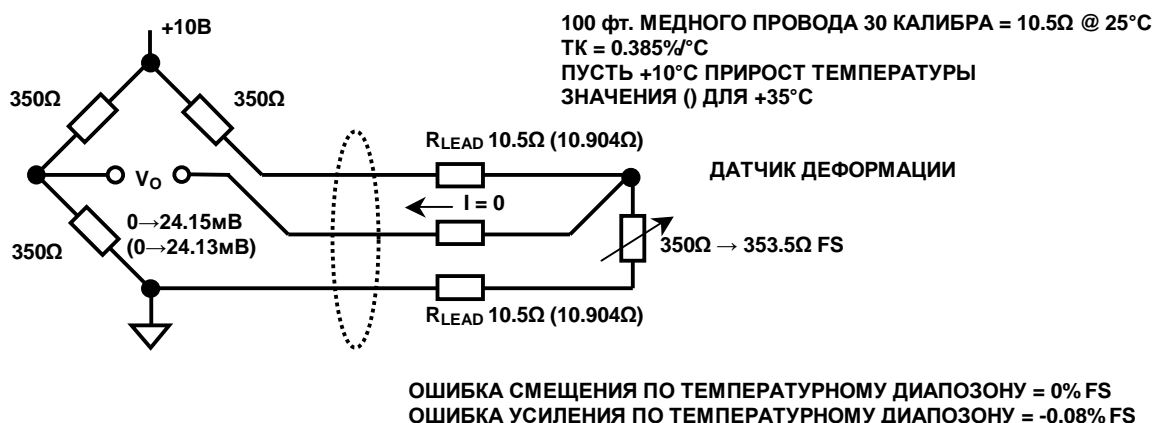


Рис.2.14. Ошибки, обусловленные сопротивлением соединительных проводов резистивного моста при 3-проводном соединении.

Предполагается использование высоко импеданного устройства для измерения выхода с моста (поэтому входной ток равен нулю). Вычисленная ошибка коэффициента передачи и смещения нуля при увеличении температуры среды на $+10^{\circ}\text{C}$ при 10В возбуждении составит, соответственно, КПО = -0.08% от верхнего предела и СНО = 0% от верхнего предела.

3-х проводное подключение дистанционного чувствительного элемента дает весьма хорошие результаты. Однако, в конструктивно законченных устройствах, например, элементе нагрузки, применяется полномостовая конфигурация. При дистанционном расположении такого элемента от нормирующей электроники, для сохранения высокой точности полного моста следует применять специальные методы.

Особое внимание уделяется поддержанию точности и стабильности напряжения возбуждения моста, поскольку выход моста прямо пропорционален возбуждению.

По этой причине большинство из устройств с полно мостовой конфигурацией соединяются по шести проводной схеме: два провода - выход моста, два - возбуждение моста и два - чувствительные провода. Такой метод (соединение Кельвина) показан на Рис.2.15. Подключение Кельвина ликвидирует падение напряжения возбуждения на соединительных проводниках. Но, следует указать, что ОУ должны иметь малые смещение, дрейф и шумы.

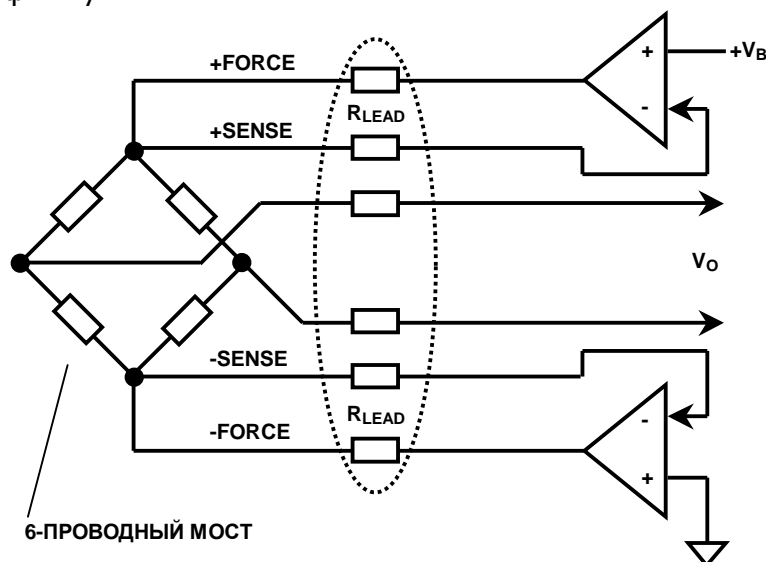


Рис.2.15. Минимизация ошибок, связанных с сопротивлением проводников при Кельвиновском (4-проводном) соединении.

На Рис.2.16 показан другой способ минимизации ошибок, обусловленных наличием сопротивления соединительных проводов, с помощью источника тока возбуждения. Требуется стабильность ИОН, измерительного резистора R_S и операционного усилителя.

На Рис.2.17 показан относительный метод минимизации ошибок, обусловленных наличием сопротивления соединительных проводов. Метод использует Кельвиновское 4-х проводное подключение питания моста и является мощным средством минимизации ошибок. Мост питается от однополярного источника питания. Измеряющий АЦП AD7730 использует напряжение на мосту в качестве собственного ИОН. При таком включении изменение напряжения на мосту не приводит к изменению выходного кода АЦП. AD7730 является 24-разрядным сигма-дельта АЦП и обеспечивает канал программируемым усилением, ФНЧ и самокалибровкой, что делает его незаменимым в приложениях, связанных с мостовыми датчиками. AD7730 обеспечивает дрейфы напряжения смещения $5 \text{ нВ}/^{\circ}\text{C}$ и коэффициента передачи $2 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, которые можно уменьшить, используя системную калибровку. (Обсуждение АЦП данного типа приводится Разделе 8).

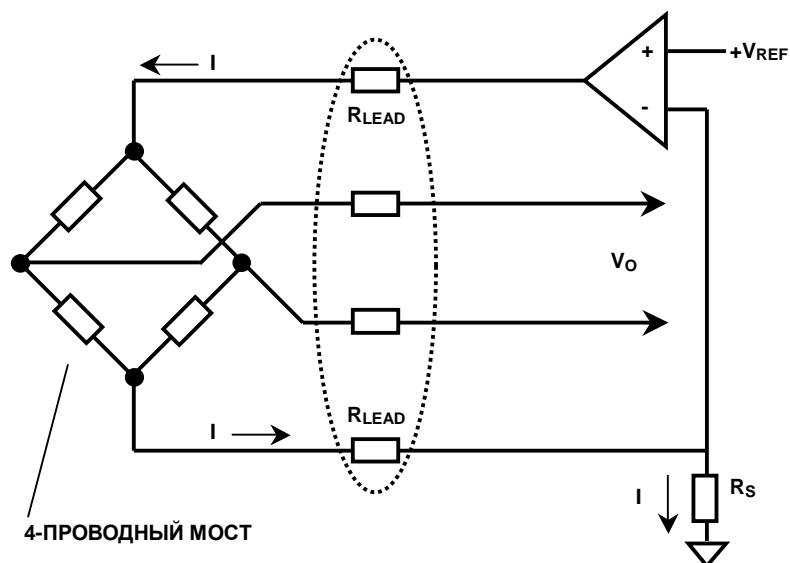


Рис.2.16. Минимизация ошибок при использовании источника постоянного тока возбуждения.

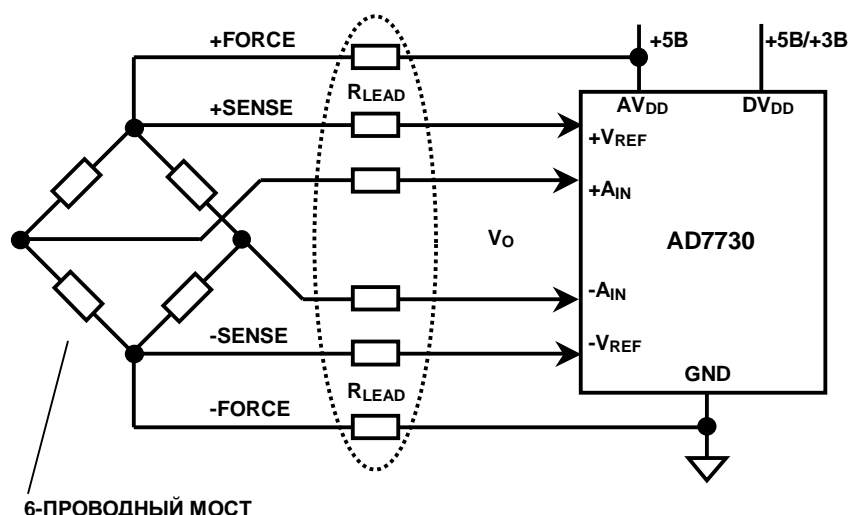


Рис.2.17. Управление дистанционным мостом, используя Кельвинское относительное подключение к АЦП

Для поддержания точности измерения на уровне 0.1% или выше по верхнему пределу 20 мВ, требуется иметь суммарную ошибку менее чем 20 мкВ. На Рис.2.18 показаны неизбежные в системе типичные источники ошибок.

Во-первых, паразитные термопары со спаями, находящимися при разных температурах (печатный проводник - коваровый вывод операционного усилителя с ТК напряжения = 35 мкВ/°С). Существенно уменьшить величину ТКН, можно используя операционный усилитель в пластмассовом корпусе с медными выводами.

Во-вторых, напряжение и ток смещения входного операционного усилителя. Необходимо выбирать операционный усилитель с малыми дрейфом смещения и током смещения, такие как OP177 или AD707. В особых случаях могут потребоваться операционный усилитель со стабилизацией по прерыванию: AD8551/AD8552/AD8554.

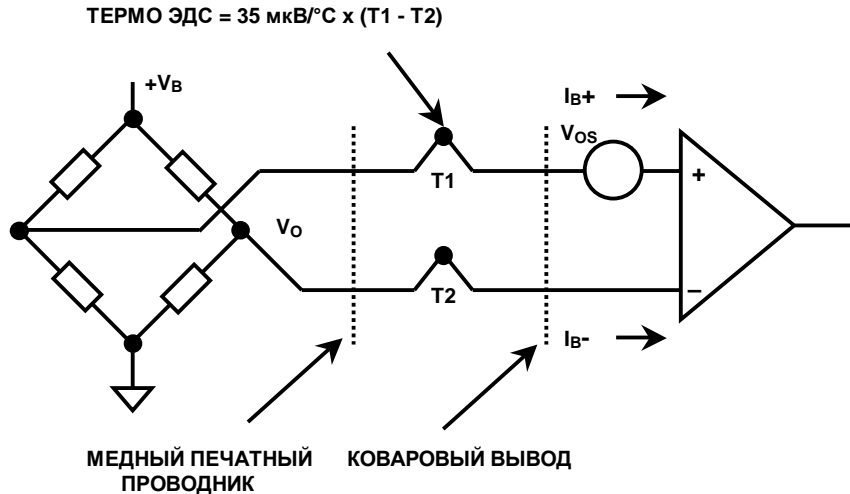


Рис.2.18. Типичные источники ошибок смещения

Возбуждение моста переменным током позволяет эффективно убирать напряжение, включенное последовательно с выходом моста. Метод прост. Как показано на Рис.2.19, выходное напряжение моста измеряется дважды. Сначала измеряется выход при прямой полярности возбуждения - V_A , затем полярность возбуждения меняется на обратную и выход измеряется вновь - V_B . Производится вычитание V_B из V_A , которое дает $2V_0$, а величина, ответственная за смещение E_{OS} исчезает.

Очевидно, что данный метод требует для измерения высокоточный АЦП, а также микроконтроллер для выполнения вычитания. Если требуется выполнение относительного измерения, то АЦП должен допускать смену полярности ИОН, что допускается AD7730.

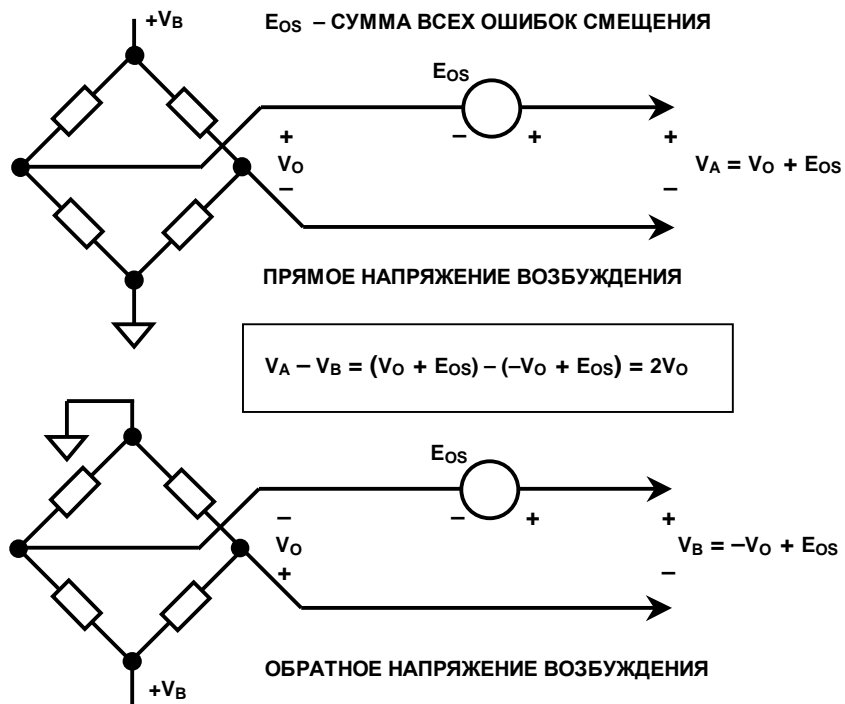


Рис.2.19. Возбуждение переменным током минимизирует ошибки смещения

Как было показано на Рис.2.20, в качестве устройства, возбуждающего мост можно применять P- и N-канальные полевые МОП-транзисторы. Имеются также специальные чипы управления, как MIC4427 от Micrel. Отметим, что поскольку канал включенного МОП-транзистора обладает сопротивлением, в данном приложении следует использовать схему Кельвина. АЦП AD7730 имеет встроенные схемы для генерации непрерывных импульсов возбуждения.

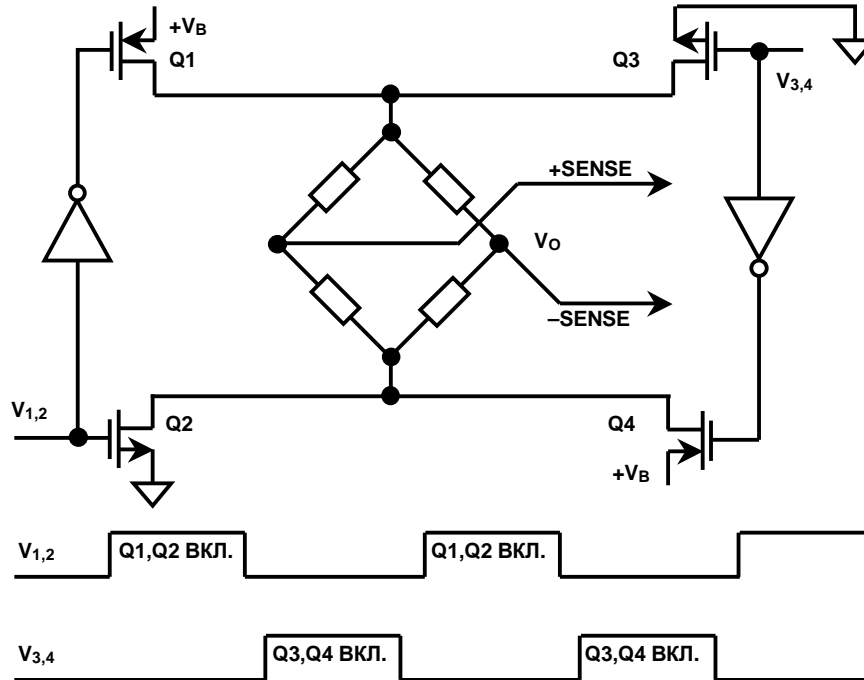


Рис.2.20. Упрощенная схема для возбуждения моста переменным током.

Литература

1. Ramon Pallas-Areny, John G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning* John Wiley, New York, 1991.
2. Dan Sheingold, Editor, *Transducer Interfacing Handbook* Analog Devices, Inc., 1980.
3. Walt Kester, Editor, *1992 Amplifier Applications Guide*, Section 2, 3 Analog Devices, Inc., 1992.
4. Walt Kester, Editor, *Amplifier Applications Guide*, Section 1, 6 Analog Devices, Inc., 1993.
5. AD7730 Data Sheet
Analog Devices, доступно на <http://www.analog.com>

