

РАЗДЕЛ 4

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ, СИЛЫ, ДАВЛЕНИЯ И ПОТОКА

РАЗДЕЛ 4: ДЕФОРМАЦИЯ, СИЛА, ДАВЛЕНИЕ И ПОТОК

Уолт Кестер

■ Тензометрические датчики**■ Цепи нормирования сигналов с измерительных мостов**

Наиболее массовыми электрическими элементами, используемыми для измерения величины силы, являются резистивные и полупроводниковые тензометрические датчики, а также пьезоэлектрические преобразователи. Тензометрический датчик измеряет силу косвенным методом - путем измерения деформации калиброванного элемента, вызванной действием данной силы. Для измерения давления, можно конвертировать его соответствующим преобразователем в силу, а затем измерить ее тензометрическим методом. Скорость потока можно измерить с использованием дифференциального метода измерения, который также использует технологию тензометрических датчиков.

- | | |
|--------------|--|
| ◆ Деформация | Тензодатчик, пьезоэлектрический преобразователь |
| ◆ Сила | Элемент нагрузки (динамометр) |
| ◆ Давление | Диафрагма преобразует в силу, измеряемую тензодатчиком |
| ◆ Поток | Методы измерения дифференциального давления |

Рис.4.1. Измерение механических величин с помощью тензодатчиков.

Резистивный тензодатчик представляет собой основание с закрепленным на нем резистивным элементом. Под действием силы основание с закрепленным элементом меняет свои размеры (сжимается или растягивается), следовательно, резистивный элемент также изменяет свое сопротивление. Вероятно, тензодатчик является наиболее известным преобразователем силы в электрическую величину.

На Рис.4.2 изображен ненаклеиваемый тензодатчик, состоящий из проволоочки, натянутой между двумя стойками. Сила, воздействуя на проволоочку (площадью сечения = A , длиной = L , с удельным сопротивлением = ρ), вызовет удлинение или сжатие последней, что приведет к пропорциональному увеличению или уменьшению ее сопротивления:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

где, GF характеризует тензочувствительность (значение 2.0..4.5 - для металлов и более 150 для полупроводников).

Безразмерная величина $\Delta L/L$ является мерой силы, приложенной к проволоочке, и выражается в микроstrain ($1 \mu\epsilon = 10^{-6}$ см/см), что является тем же самым, что и миллионная часть (ppm) (в отечественной литературе применяется более естественный термин - *eод* - единицы относительной деформации, численно равный количеству микроstrain). Из равенства следует, что чем больше тензочувствительность, тем больше величина изменения сопротивления и, следовательно, выше чувствительность датчика.

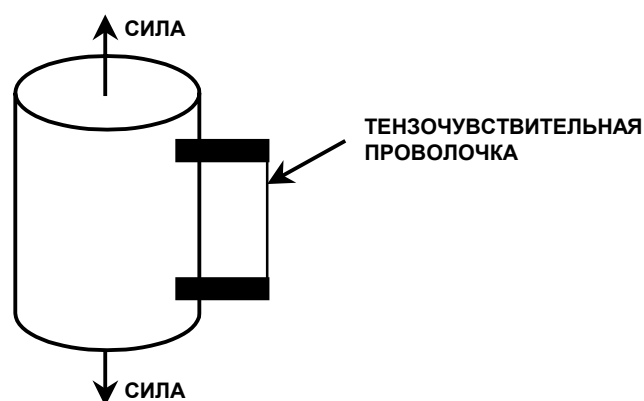


Рис.4.2. Ненаклеиваемый проволочный тензодатчик.

Наклеиваемый тензодатчик состоит из тонкой проволочки или проводящей фольги, закрепленной на плоской пластине. Эта конструкция затем приклеивается на основание. Датчик обычно устанавливается так, чтобы его наиболее длинная сторона была ориентирована в направлении измеряемой силы. Обычно наклеиваемые датчики используются много чаще ненаклеиваемых.

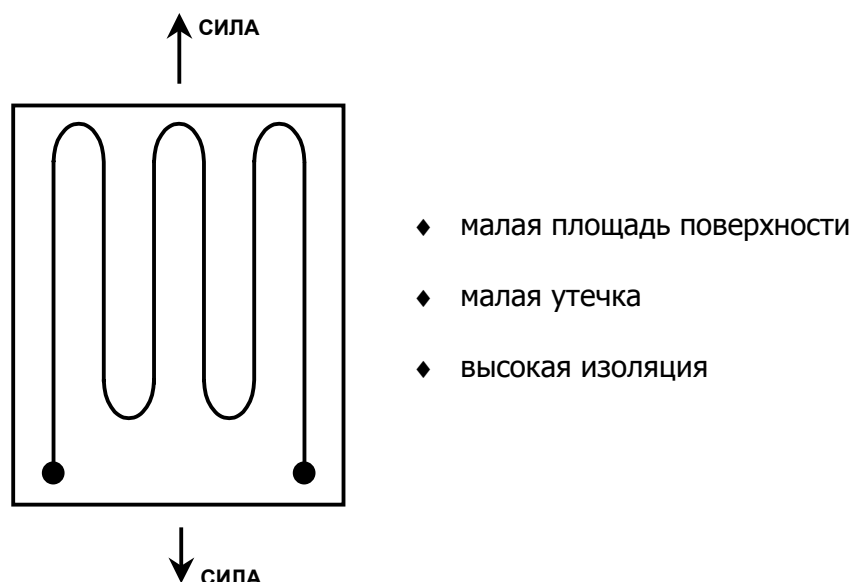
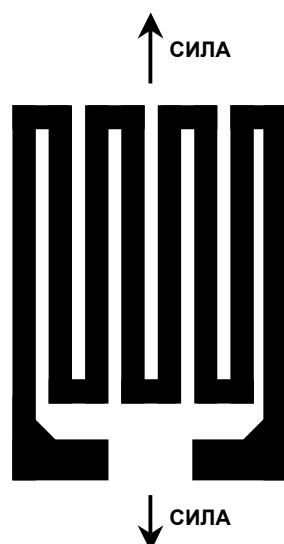


Рис.4.3. Наклеиваемый проволочный тензодатчик.

Фольговые датчики являются наиболее популярной версией наклеиваемых тензодатчиков. Они изготавливаются методом фототравления и используют те же металлы, что и проволочные датчики (константан, нихром, сплав никеля с железом и т.д. см. Рис.4.4). Проволочные датчики имеют малую поверхность связи с образцом (основанием), что уменьшает токи утечки при высоких температурах и дает большее напряжение изоляции между чувствительным элементом и образцом. С другой стороны, фольговые чувствительные элементы имеют большое отношение площади поверхности к площади поперечного сечения (чувствительность) и более стабильны при критических температурах и длительных нагрузках. Большая площадь поверхности и малое поперечное сечение также обеспечивают хороший температурный контакт чувствительного элемента с образцом, что уменьшает саморазогрев датчика.



- ◆ методика фототравления
- ◆ большая площадь
- ◆ стабилен в диапазоне температур
- ◆ малое поперечное сечение
- ◆ хорошее рассеивание тепла

Рис.4.4. Металлофольговый тензодатчик.

Полупроводниковые тензодатчики используют пьезорезистивный эффект, возникающий в некоторых полупроводниковых материалах, таких как кремний и германий, и используются для получения большей чувствительности устройства и его выходного сигнала. Можно сделать так, чтобы полупроводниковые датчики имели при их деформировании либо положительный, либо отрицательный сигнал. Их можно сделать достаточно малых размеров при сохранении высокого номинала сопротивлений. Полупроводниковые тензомосты обладают в 30 раз большей чувствительностью чем металлофольговые, но они зависят от температуры и трудно поддаются компенсации. Изменение их сопротивления от деформации также нелинейное. Для прецизионных измерений их не используют столь же широко, как более стабильные металлофольговые; однако, в приложениях, где вариации температуры малы, а величина чувствительности важна, они могут иметь определенные преимущества. Применяемый инструментарий подобен аппаратуре металлофольговых датчиков, только менее критичен при выборе, что определяется большими уровнями сигналов и меньшей точностью преобразователей.

Параметр	Металлический тензодатчик	Полупроводниковый тензодатчик
Диапазон измерения	0.1 .. 40,000 $\mu\epsilon$	0.001 .. 3000 $\mu\epsilon$
Тензочувствительность	2.0 .. 4.5	50 .. 200
Сопротивление, Ω	120, 350, 600, .. , 5000	1000 .. 5000
Допуск резисторов	0.1% .. 0.2%	1% .. 2%
Размер, мм	0.4 .. 150 (стандарт 3 ..6)	1 .. 5

Рис.4.5. Сравнение металлических и полупроводниковых тензодатчиков.

Пьезоэлектрические преобразователи силы применяются там, где сила, которая будет измеряться, носит динамический характер (т.е. меняющаяся в измеряемом интервале времени, порядка нескольких мс). Данные устройства используют эффект изменения заряда, имеющий место в некоторых материалах, когда они подвергаются механическим напряжениям. Фактически, пьезоэлектрические преобразователи являются преобразователями сдвига (смещения) с достаточно большим зарядом на выходе при малом механическом сдвиге, и они часто используются как преобразователи силы, считая, что в упругих материалах сдвиг пропорционален приложенной силе.

Пьезоэлектрические устройства дают значительное выходное напряжение в таких устройствах как, например, акселерометры. Их выходной импеданс большой и для нормирования сигналов требуются зарядочувствительные усилители с малой входной емкостью. Детальное обсуждение проводится в Разделе 5.

Тензодатчики можно использовать для измерения силы, как показано на Рис.4.6. Здесь приложенная сила слегка отклоняет консольную балку. Для измерения используются четыре тензорезистора, закрепленных на балке: два на верхней поверхности и два на нижней. Датчики включаются по полномостовой схеме. Данная схема дает максимум чувствительности и линейности (Раздел 2) и обеспечивает, в первом приближении, компенсацию температурного дрейфа индивидуальных резисторов.

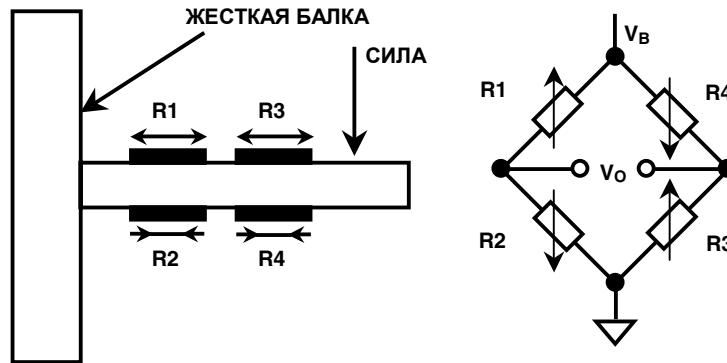


Рис.4.6. Тензометрический балочный динамометр.

Тензодатчики являются низкоимпедансными устройствами; поэтому они требуют значительной мощности возбуждения для получения приемлемых уровней выходного напряжения. Типовой тензомостовой датчик имеет (в общем случае) импеданс 350Ω и специфицируется как устройство, имеющее чувствительность, выражаемую в милливольтках полной шкалы на вольт напряжения возбуждения. На Рис.4.7 показан элемент нагрузки (динамометр), состоящий из четырех тензорезисторов.

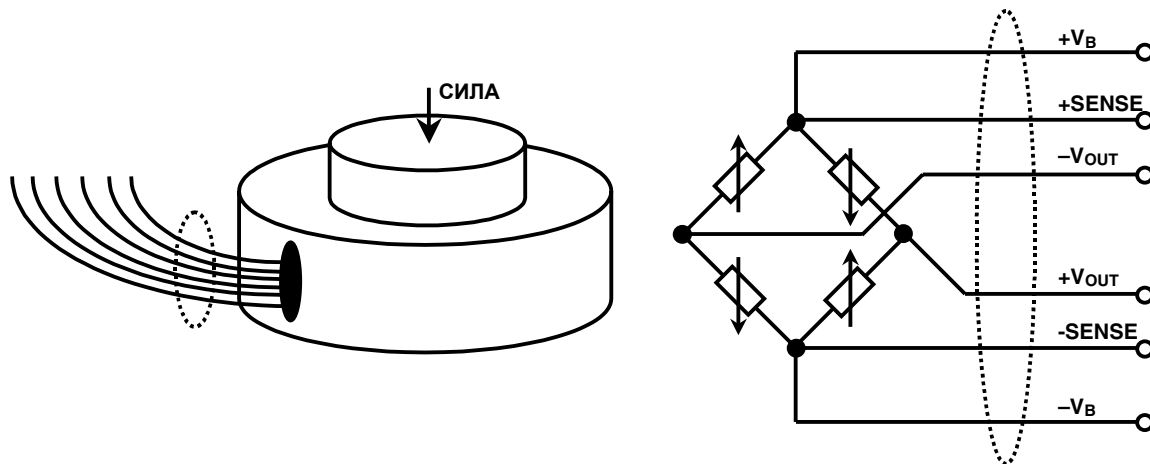


Рис.4.7. 6-проводной динамометр.

При возбуждении 10 В и коэффициенте преобразования 3 мВ/В, верхний предел (сигнал полной шкалы при номинальной нагрузке) составит 30 мВ. Выходной сигнал можно увеличить за счет большого возбуждения, однако существенным ограничением такого приема является эффект саморазогрева моста: увеличатся ошибки измерения и может даже произойти разрушение устройства.

Многие динамометры имеют «чувствительные» выводы, которые позволяют компенсировать падение части постоянного напряжения возбуждения на питающих проводах. Некоторые элементы нагрузки имеют дополнительные внутренние резисторы для термокомпенсации.

Давления в жидкостях и газах измеряются электрическими методами с помощью различных преобразователей давления. Большое число механических конвертеров (включая диафрагмы, капсулы, сильфоны и манометрические трубки) используется для измерения давления путем измерения связанных с ним изменений длины, расстояния или перемещения.

Выход полученного механического интерфейса подается на электрический конвертор, как тензодатчик или пьезоэлектрический преобразователь. В противоположность тензодатчикам, пьезоэлектрические преобразователи давления обычно используются при высокочастотном измерении давления (приложения, связанные с гидроакустикой и кристаллическими микрофонами).

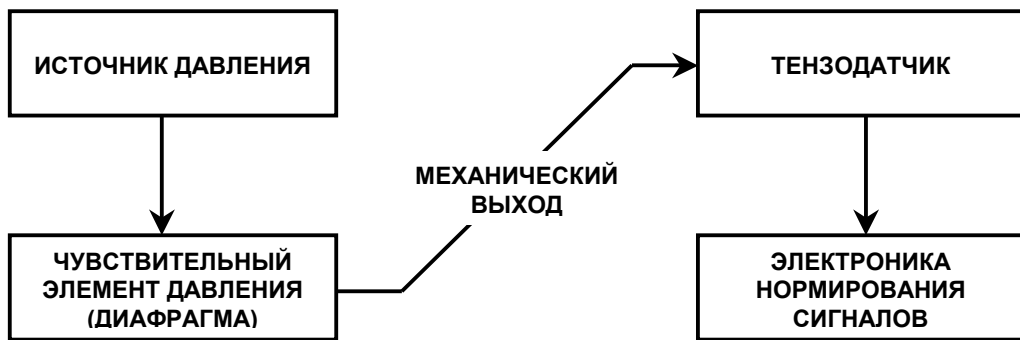


Рис.4.8. Датчики давления.

Существует много способов определения потока (поток массы, объемный поток, ламинарный поток, турбулентный поток). Наиболее важным является измерение количества протекающего (проходящего) вещества и если плотность жидкости постоянна, то измерение потока по объему, который измерить легче. Обычно используемый класс преобразователей, которые косвенно измеряют скорость потока, включает в себя измерители давления.

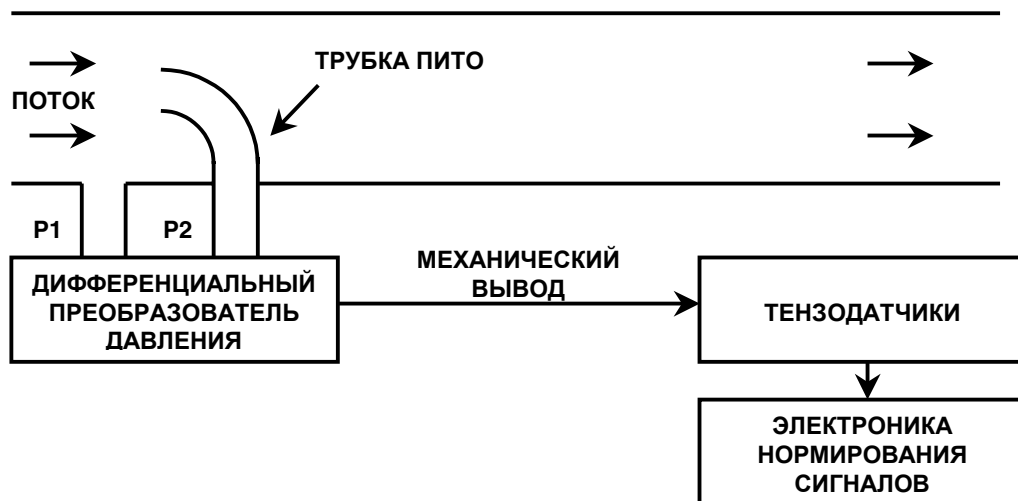


Рис.4.9. Трубка Пито, используемая для измерения скорости потока.

Поток можно измерить, узнав дифференциальное давление между двумя точками в протекающей среде: одна статическая, другая в потоке. Трубки Пито один из видов устройств, используемых для выполнения этой функции. Как показано на Рис.4.9, скорость потока измеряется путем измерения дифференциального давления стандартным преобразователем давления. Дифференциальное давление можно также использовать для измерения скорости потока при использовании эффекта *вентури* (эффект заключается в помещении на пути потока сужающего устройства, см. Рис.4.10). Рис.4.11 изображают помещенную в поток изгибающуюся лопасть с закрепленным на ней тензодатчиком для измерения скорости потока.

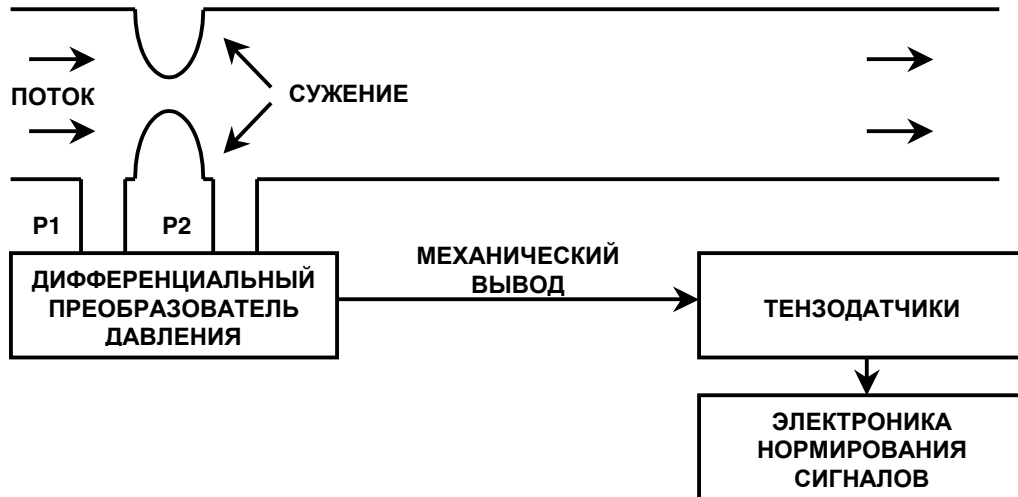


Рис.4.10. Использование эффекта вентури для измерения скорости потока.



Рис.4.11. Использование сгибающейся лопасти с тензодатчиком для определения скорости потока

Цепи нормирования сигналов с измерительных мостов

На Рис.4.12 показана полномостовая цепь для измерения деформации при испытании материала на усталость. Мост является интегральным устройством и может быть закреплен на поверхности, деформацию или изгиб которой необходимо измерить. В схеме используется генератор тока возбуждения, для выполнения дистанционных измерений. OP177 питает мост током 10 мА, используя источник опорного напряжения 1.235 В. Тензодатчик дает выходной сигнал 10.25 мВ/1000 мк. Сигнал усиливается инструментальным усилителем AD620 с коэффициентом усиления 100. Величину напряжения верхнего предела (полной шкалы) можно устанавливать, подстраивая потенциометр 100Ω так, чтобы для деформации 3500 мк выход составлял -3.500 В, а для деформации +5000 мк выход +5.000 В. Далее сигнал можно преобразовать с помощью АЦП с верхним пределом по входу 10 В. Конденсатор 0.1 мкФ на входе инструментального усилителя совместно с сопротивлением моста 1 кΩ составляют низкочастотный фильтр для радиочастотных помех. Частота среза НЧ-фильтра составляет около 1.6 КГц.

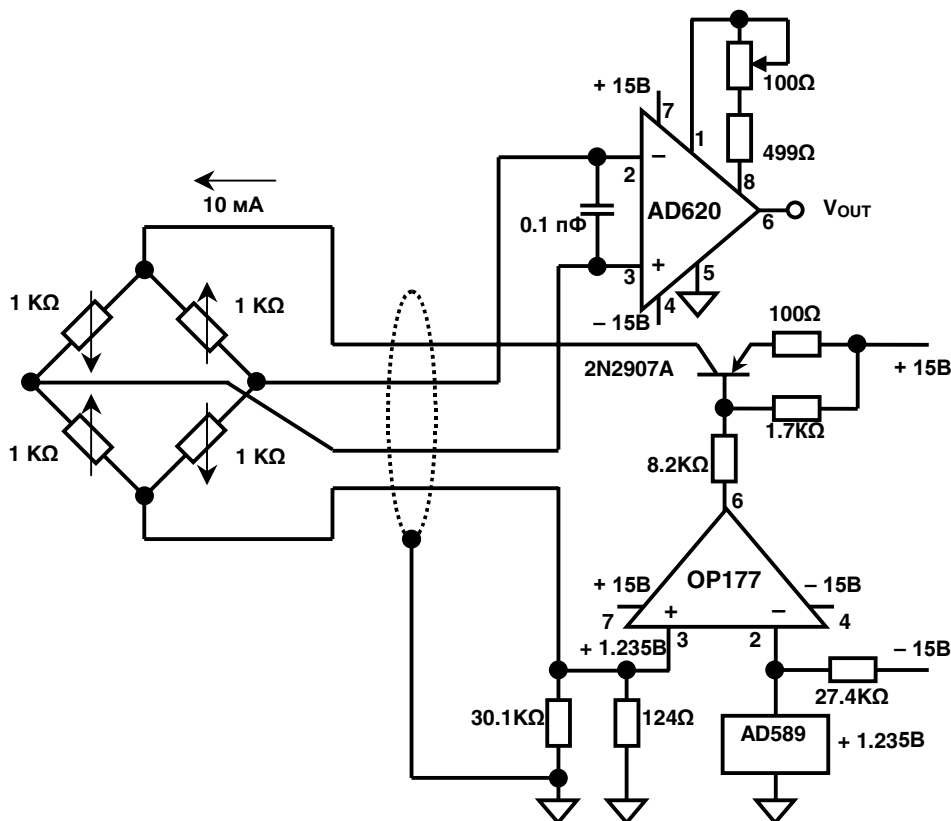


Рис.4.12. Прецизионный усилитель для тензометрического датчика.

На Рис.4.13 показан другой пример цепи - усилитель динамометра (элемента нагрузки). Типовое сопротивление моста 350Ω. 10.000 В возбуждение моста получают с помощью источника опорного напряжения на AD588, OP177 и транзистора 2N2219A, обеспечивающего ток 28.57 мА. Для сохранения высокой линейности используется инструментальный усилитель. Схема содержит минимальное количество критических резисторов и усилителей, что обеспечивает точность, стабильность и малую стоимость. Единственным требованием является низкий температурный коэффициент резистора 475Ω и потенциометра 100Ω для обеспечения низкого температурного дрейфа.

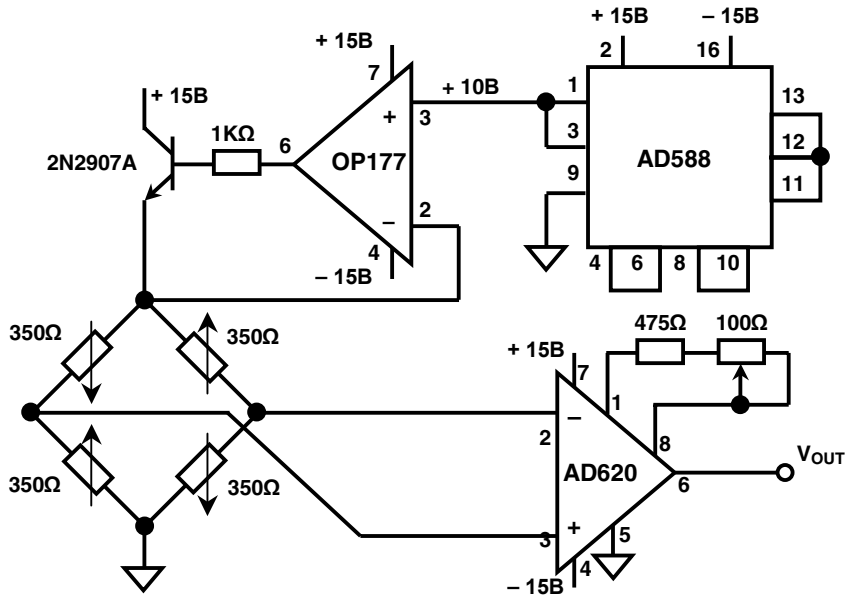


Рис.4.13. Прецизионный усилитель для динамометра.

Как отмечалось ранее, прецизионный динамометр обычно представляет собой 350Ω измерительный мост. На Рис.4.14 показан прецизионный усилитель динамометра с однополярным питанием. Прецизионный 5 В ИОН REF195 с высокой нагрузочной способностью (30 мА) используется для питания моста. Сдвоенный операционный усилитель OP213 образует ИУ на двух ОУ с коэффициентом усиления 100. Усиление задается резисторами:

$$G = 1 + \frac{10 \text{ K}\Omega}{1 \text{ K}\Omega} + \frac{20 \text{ K}\Omega}{196 \Omega + 28.7 \Omega} = 100$$

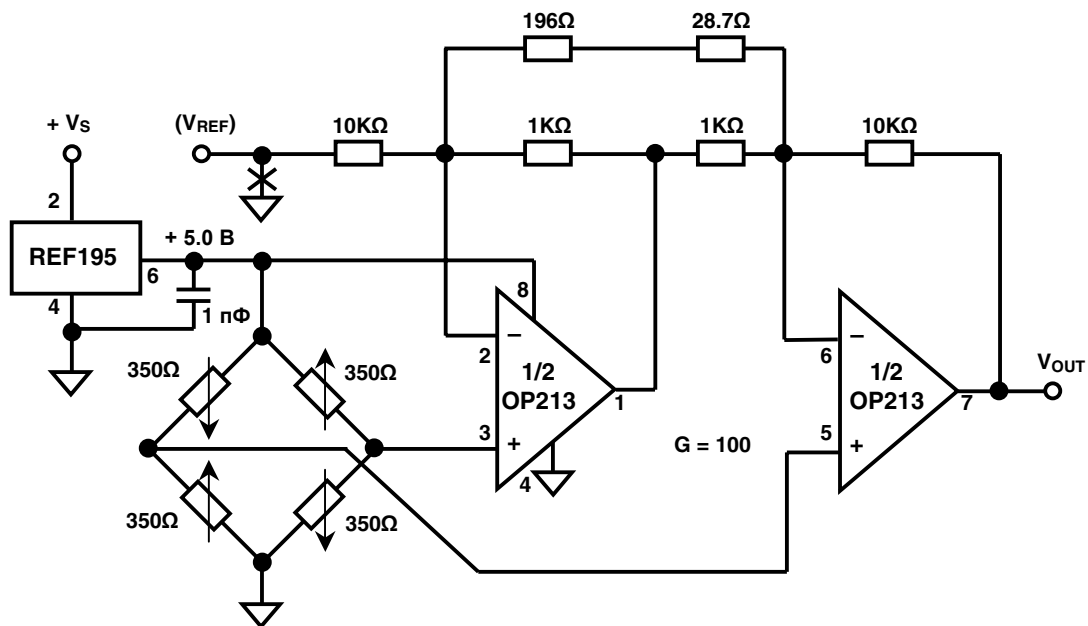


Рис.4.14. Усилитель с однополярным питанием для элемента нагрузки.

Для максимального ослабления синфазного сигнала необходимо точное отношение входящих резисторов. Следует использовать резисторы с допуском не менее $\pm 0.5\%$. Для нулевого выходного сигнала моста выход усилителя составит $2.5 \text{ мВ} \dots 0 \text{ В}$, что является минимальным пределом для ОУ OP213. Поэтому, если требуется подстраивать смещение ОУ, подстройку следует начинать с положительного значения напряжения в точке V_{REF} и уменьшать его до тех пор, пока выходное напряжение (V_{OUT}) не прекратит изменяться. Это будет точкой ограничения для данного усилителя. Вследствие особенности конструкции с однополярным питанием, усилитель не может передавать сигналы отрицательной полярности. Если требуется иметь высокую линейность в точке 0 В или требуется работать с отрицательными сигналами, то точку V_{REF} следует подключить к среднему потенциалу относительно питания ($+2.5 \text{ В}$), а не к земле. Отметим, когда V_{REF} не заземлен, выходной сигнал должен отсчитываться от значения V_{REF} .

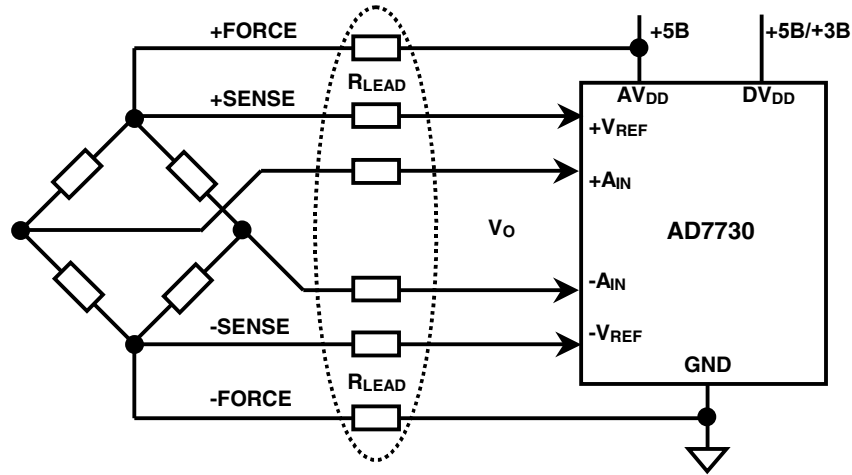


Рис.4.15. Использование AD7730 для элемента нагрузки (динамометра).

24-разрядный сигма-дельта АЦП AD7730 является идеальным устройством для прямого подключения к мосту безинтерфейсных цепей. Упрощенная схема подключения показана на Рис.4.15. Вся схема питается от одного источника $+5 \text{ В}$, являющегося также источником возбуждения моста. Отметим, что измерения являются относительными, так как напряжение на чувствительных выводах моста одновременно является опорным для АЦП. Изменения величины напряжения $+5 \text{ В}$ не влияют на точность измерения.

- ◆ Допущение:
 - Выход полной шкалы $\pm 10 \text{ мВ}$ при возбуждении 10 В
 - Активирован «режим прерывания»
 - Выполняется системная калибровка: «ноль» и «полная шкала»
- ◆ Работа:

▪ Шум, приведенный к входу:	40 нВ (действующее), 264 нВ (p-p)
▪ Разрешение (без шумов):	80000 отсчетов (16.5 разрядов)
▪ Нелинейность усиления:	18ppm
▪ Точность усиления:	< 1 мкВ
▪ Напряжение смещения:	< 1 мкВ
▪ Дрейф смещения:	0.5 мкВ/°C
▪ Дрейф усиления:	2ppm/°C

Примечание: дрейф усиления и смещения устраняются системной калибровкой

Рис.4.16. Работа АЦП AD7730 в составе динамометра.

AD7730 содержит внутренний усилитель с программируемым усилением, позволяющий преобразовывать выходное напряжение полной шкалы моста ± 10 мВ с точностью 16 разрядов. AD7730 может выполнять самокалибровку и системную калибровку, что при периодическом выполнении позволяет минимизировать ошибки усиления и смещения. В этом смысле действие АЦП очень похоже на работу усилителя, стабилизированного прерыванием. Действующее напряжение шума, приведенное к входу, составляет около 40 нВ, или 264 нВ от пика до пика, что соответствует разрешению 13 ppm или около 16.5 разрядов. Линейность усиления также около 16 разрядов. Дальнейшее обсуждение работы AD7730 можно найти в Разделе 8.

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, *System Applications Guide*, Section 1, 6, Analog Devices, Inc., 1993.
5. Harry L. Trietley, *Transducers in Mechanical and Electronic Design*, Marcel Dekker, Inc., 1986.
6. Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors, Second Edition*, Springer-Verlag, New York, NY, 1996.
7. Omega Engineering, *The Pressure, Strain, and Force Handbook*, Vol. 29, One Omega Drive, P.O. Box 4047, Stamford CT, 06907-0047, <http://www.omega.com>
8. Omega Engineering, *The Flow and Level Handbook*, Vol. 29, One Omega Drive, P.O. Box 4047, Stamford CT, 06907-0047, <http://www.omega.com>
9. Ernest O. Doebelin, *Measurement Systems Applications and Design*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 1990.
10. AD7730 Data Sheet, Analog Devices, <http://www.analog.com>.

