

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Класификация на сензорите

Сензорите могат да бъдат класифицирани по няколко начина. От гледна точка на изработването на сигнала се класифицират като **активни** или **пасивни**. Активните сензори изискват външен източник на възбуждане. Сензори, базирани на съпротивление, като термистори, терморезистори и тензодатчици са примери за активни сензори, тъй като през тях трябва да протече ток и да се измери съответното напрежение, за да се определи стойността на съпротивлението. Алтернативата е да се включат в мостова схема, но и тогава е необходим външен източник на ток или напрежение.

От друга страна, пасивните (или самогенериращи) сензори генерират свой собствен електрически изходен сигнал, без да изискват външни напрежения или токове. Примери за пасивни сензори са термодвойките и фотодиодите, които генерират съответно термоелектрически напрежения и фототокове, които са независими от външни вериги.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Класификация на сензорите

| Величина      | Сензор          | Действие | Изход          |
|---------------|-----------------|----------|----------------|
| Температура   | Термодвойка     | Пасивен  | Напрежение     |
|               | PN преход       | Активен  | Напрежение/ток |
|               | Терморезистор   | Активен  | Съпротивление  |
|               | Термистор       | Активен  | Съпротивление  |
| Сила/налягане | Тензорезистор   | Активен  | Съпротивление  |
|               | Пиезоелектричен | Пасивен  | Напрежение     |
| Ускорение     | Акселерометър   | Активен  | Капацитет      |
| Светлина      | Фотодиод        | Пасивен  | Ток            |

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Видове сензори според чувствителния елемент:

- **Съпротивителни (с паразитни добавки L, C);**

Измервани величини - температура, деформации (тегло);  
топлопроводност и др.

Видове сензори за температура:

Термо-съпротивления от чисти метали - платина, никел, мед и др.;

Термистори – полупроводникови резистори;

Тензорезистори – сила, налягане;

- **Капацитивни;**

Измервани величини - размери, тегло, налягане, газосъдържание  
(влажност);

- **Индуктивни;**

Измервани величини - деформации;

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Видове сензори според изходния сигнал:

- **Напрежение;**

Измервани величини - температура;

Видове сензори за температура:

Термодвойки – единствените които дават енергия и са източници на напрежение;

Дискретни полупроводникови - напрежение на p-n преход ( $-2,2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ );

Интегрирани;

- **Ток;**

Измервани величини – електрохимични величини;

- **Индуктивни;**

Измервани величини - деформации;

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Класификация на сензорите

Максималните стойности на изходните величини на повечето сензори (пасивни или активни) са сравнително малки напрежения, токове или промени в съпротивлението и следователно изходните сигнали трябва да бъдат правилно снети, преди да се извърши по-нататъшна аналогова или цифрова обработка. Поради това се е развил цял клас схеми, обикновено наричани схеми за преобразуване на сигнала. Усилване, транслация на ниво, галванична изолация, трансформация на импеданса, линеаризация и филтриране са основни задачи за преобразуване на сигнала, които може да се приложат.

Повечето изходни сигнали на сензорите са нелинейни по отношение на физическата величина и трябва да бъдат линеаризирани, за да се получат точни измервания. За тази цел могат да се използват аналогови техники. Въвеждането на АЦП с висока производителност обаче позволява линеаризацията да се извършва много по-ефективно и точно в софтуера и елиминира необходимостта от ръчно калибриране с помощта на множество и понякога интерактивни настройки.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Съпротивителните сензори са едни от най-разпространените тъй като са евтини за производство и сравнително лесни за свързване към схеми за формиране на сигнала. Съпротивителните сензори са чувствителни към температура, налягане (чрез натиск или чрез огъване) и светлина. С помощта на тези основни елементи могат да бъдат измерени много сложни физически явления; като флуиден или масов поток (чрез отчитане на температурната разлика между две калибрирани съпротивления) и влажност чрез точката на оросяване (чрез измерване на две различни температурни стойности) и др.

Съпротивлението на сензорните елементи може да варира от по-малко от  $100\Omega$  до няколкокостотин  $k\Omega$ , в зависимост от схемата на сензора и физическата величина, която ще се измерва. Например съпротивлението на RTD (Resistance Temperature Devices - терморезистори) обикновено е  $100\Omega$  или  $1000\Omega$ . Термисторите обикновено имат съпротивление  $3500\Omega$  или повече.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Най-популярните съпротивителни сензори имат следните обхвати:

Тензодатчици -  $120\Omega$ ,  $350\Omega$ ,  $3500\Omega$

Клетки за измерване на теглото -  $350\Omega \div 3500\Omega$

Сензори за налягане -  $350\Omega \div 3500\Omega$

Относителна влажност -  $100k\Omega \div 10M\Omega$

Терморезистори (RTD) -  $100\Omega$ ,  $1000\Omega$

Термистори -  $100\Omega \div 10M\Omega$

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

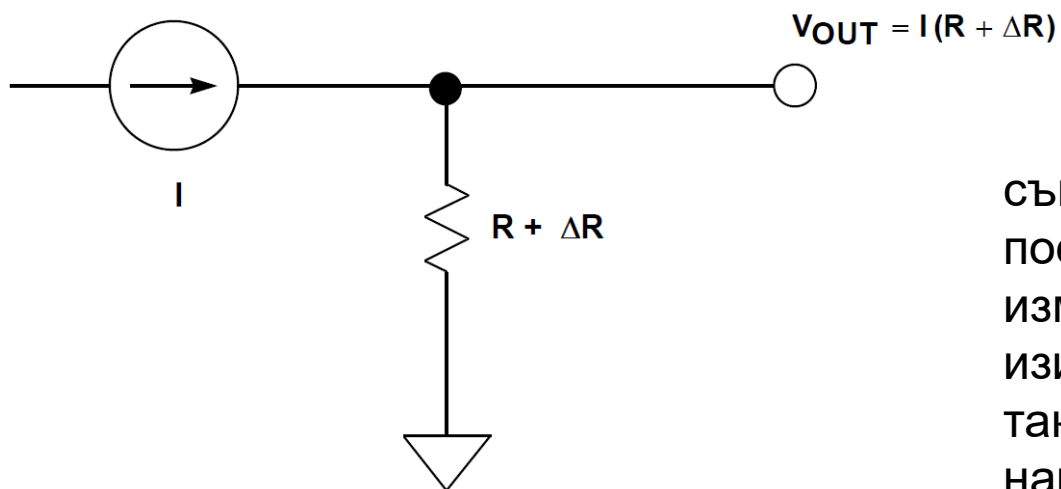
Съпротивителните сензори като RTD и тензодатчици имат малки промени в стойността вследствие на промяна във физическа величина като температура или сила. Платинените терморезистори имат температурен коефициент от около  $0,385\%/^{\circ}\text{C}$ . По този начин, за да се определи точно температурата до  $1^{\circ}\text{C}$ , точността на измерване трябва да бъде много по-добра от  $0,385\Omega$  за  $100\Omega$  RTD.

Тензодатчиците представляват значително предизвикателство при измерването, тъй като типичната промяна в съпротивлението в целия работен диапазон на тензодатчика може да бъде по-малко от 1% от номиналната стойност на съпротивлението. Ето защо точното измерване на малки промени в съпротивлението е от решаващо значение при прилагането на резистивни сензори.



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

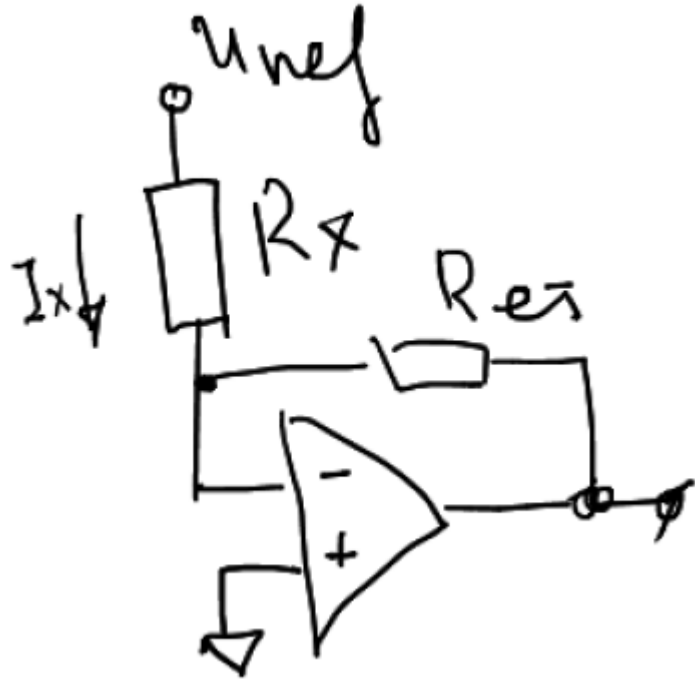


Един метод за измерване на съпротивлението е пропускане на постоянен ток през резистивния сензор и измерване на изходното напрежение. Това изисква както прецизен източник на ток, така и точно средство за измерване на напрежението. Всяка промяна на тока ще се тълкува като промяна на съпротивлението.

В допълнение, разсейването на мощността в резистивния сензор трябва да е малко, в съответствие с препоръките на производителя, така че самонагриването да не предизвиква грешки, следователно възбудителният ток трябва да е малък.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори



Схемата показва преобразуване на стойността на неизвестното съпротивление  $R_x$  в напрежение според изразите:

$$I_x = \frac{u_{ref}}{R_x} ;$$

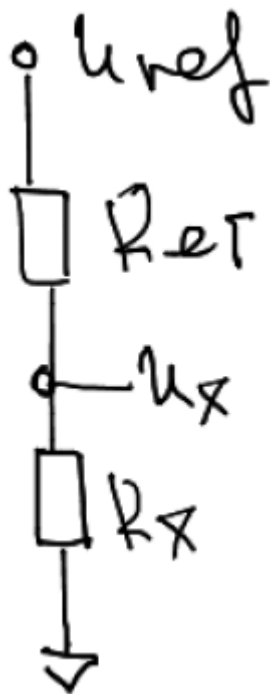
$$u_o = -I_x R_{et} = -\frac{1}{R_x} u_{ref} R_{et} ;$$

$$R_x = -\frac{u_{ref}}{u_o} R_{et} .$$

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Стойността на неизвестното съпротивление  $R_x$  може да се намери и в схеми на напрежителен делител.

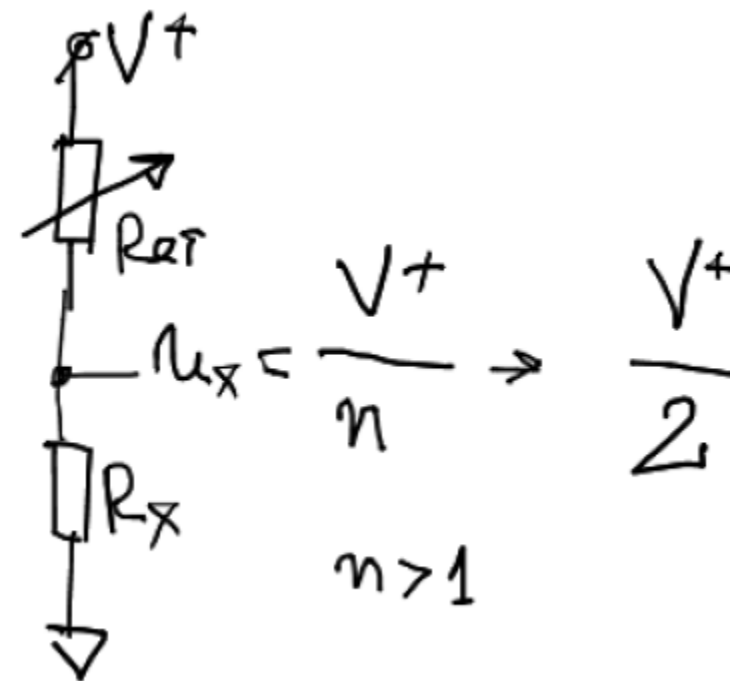


Напрежението  $u_x$  в схема без уравнивяване е:

$$u_x = u_{ref} \frac{R_x}{R_{et} + R_x}.$$

След измерване на  $u_x$  стойността на  $R_x$  е:

$$R_x = \frac{u_x R_{et}}{u_{ref} - u_x}.$$



В схема с уравнивяване:

$$u_x = \frac{V^+}{2} \Rightarrow R_x = R_{et}$$

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Измерване на активно съпротивление, нормализация на обхвата

С цел повишаване на точността на измерване се налага аналогова обработка на сигналите от сензорите, която трябва да съвмести обхватите на изменение на съпротивлението на сензора и на последващия аналогово-цифров преобразувател.

Тази предварителна обработка включва избор на коефициент на усилване, постояннотоково отместване, обхвати, линеаризиране на характеристиката и др.

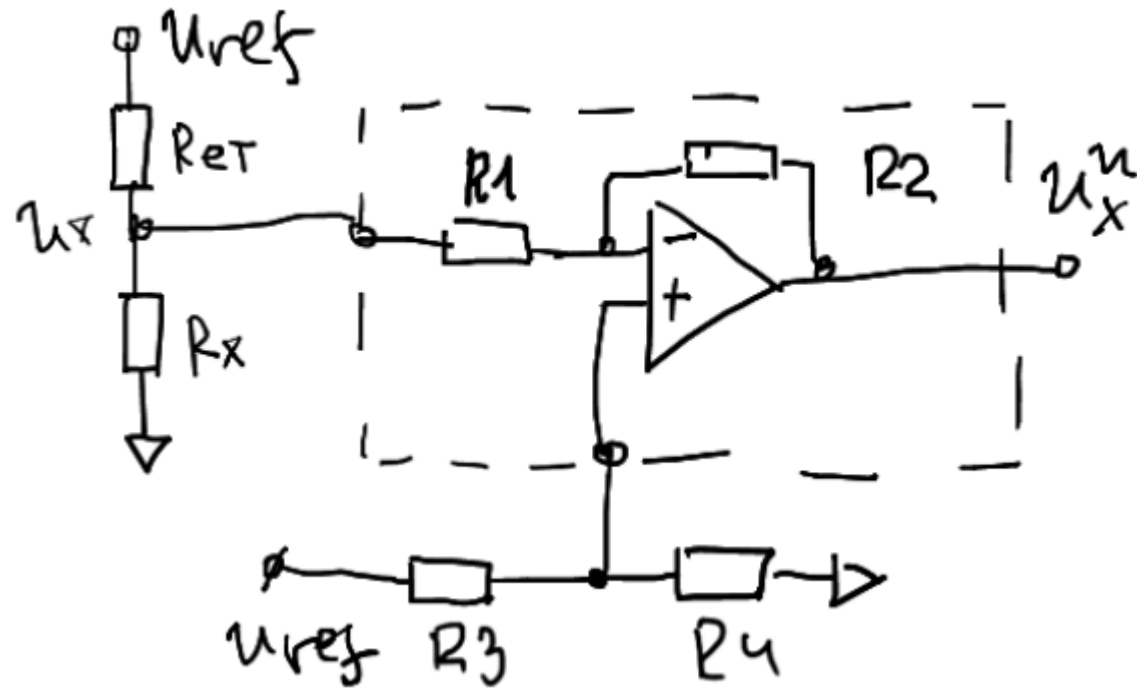
Оптималният резултат от предварителната обработка е съвпадение на границите на обхвата на изменение на измерваната величина с граничните стойности на опорното напрежение на АЦП.

При съпротивителните сензори, където изменението на съпротивлението е много малко, е необходимо да се усили полученото напрежение от сензора и да се въведе необходимото постояннотоково отместване.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Измерване на активно съпротивление, нормализация на обхвата



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Измерване на активно съпротивление, нормализация на обхвата

Показаната схема е на инвертиращ усилвател, който усилва напрежението от делителя, включващ съпротивителния сензор. Коефициентът на усилване на схемата трябва да разшири диапазона на изменение на входното напрежение до диапазона на опорното напрежение на АЦП. Поради инвертиращата схема максималната стойност на входното напрежение ще съвпада с минималната стойност на опорното напрежение и обратно.

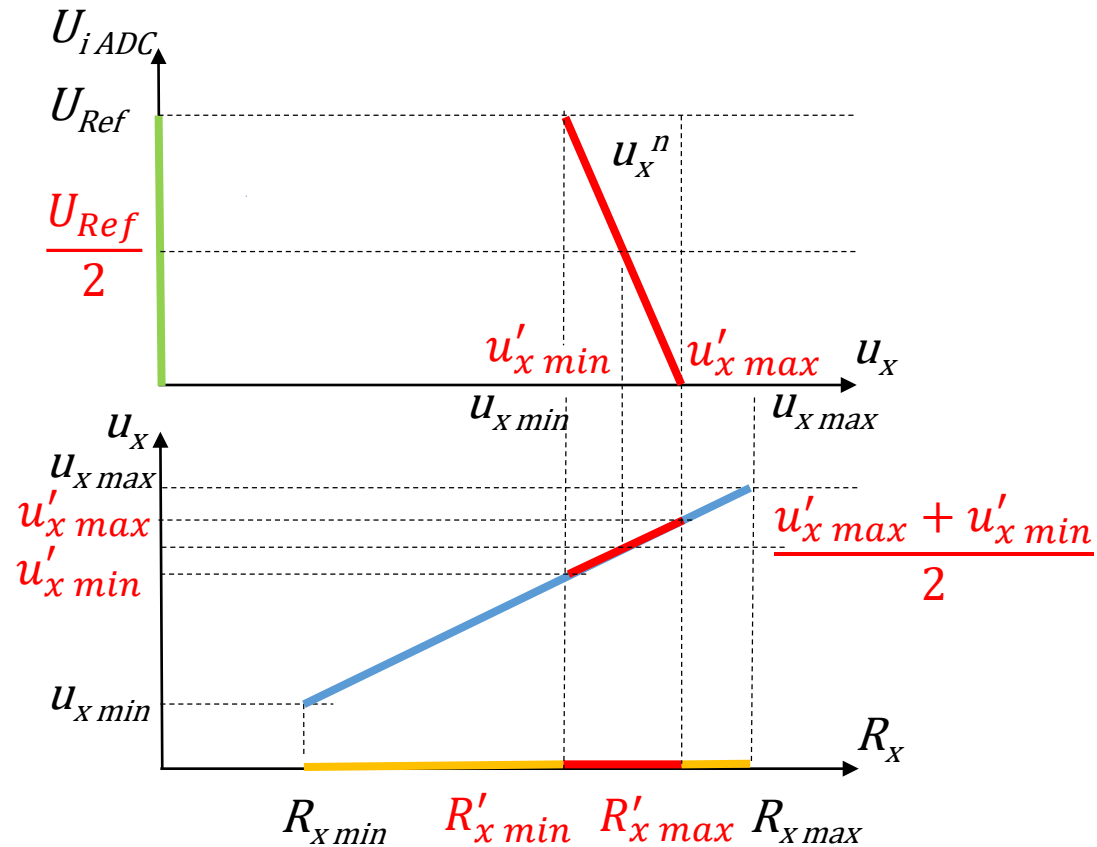
Към неинвертиращия вход се подава напрежение за постояннотоково отместване. Чрез това напрежение средната стойност на входното напрежение ще се премести до средната стойност на опорното напрежение на АЦП.

Предимство на схемата е постоянната стойност на синфазния сигнал, който съвпада с напрежението на отместването.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Измерване на активно съпротивление, нормализация на обхвата



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Измерване на активно съпротивление, нормализация на обхвата

Разглежда се диапазона на изменение на съпротивлението на сензора, определен от стойностите  $R'_{x \min}$  и  $R'_{x \max}$ . Изходното напрежение на сензора се изменя между стойностите  $u'_{x \min}$  и  $u'_{x \max}$ .

За постигане на нормализация на изходното напрежение и съгласуване на диапазоните на изменение на входното напрежение и опорното напрежение на АЦП се изчисляват стойностите на резисторите в схемата според изразите:

$$(1) \quad U_{Ref} = (u'_{x \max} - u'_{x \min}) \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{U_{Ref}}{u'_{x \max} - u'_{x \min}};$$

$$(2) \quad U_+ \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - \frac{u'_{x \max} + u'_{x \min}}{2} \cdot \frac{R_2}{R_1} = \frac{U_{Ref}}{2};$$

$$(3) \quad U_+ = U_{Ref} \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Измерване на активно съпротивление, нормализация на обхвата

След заместване на  $\frac{R_2}{R_1}$  и  $U_+$  в израз (3) и преобразуване се намира:

$$(4) \quad \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{u'_{x \max}}{u'_{x \max} - u'_{x \min} + U_{Ref}}.$$

Следователно съотношенията между резисторите  $R_1$ ,  $R_2$  от уравнение (1) и  $R_3$ ,  $R_4$  от уравнение (4) са изразени като функция само на началните условия  $u'_{x \min}$ ,  $u'_{x \max}$  и  $U_{Ref}$ . Това прави схемата универсална за приложение на съпротивителни сензори.

Пример: Да се намерят стойностите на резисторите  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , и  $R_4$  при следните начални стойности –  $R_{et} = 4k$ ,  $U_{Ref} = +5V$ ,  $R'_{x \min} = 1k$  и  $R'_{x \max} = 2,67k$ .

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Мостови схеми за измерване на активно съпротивление

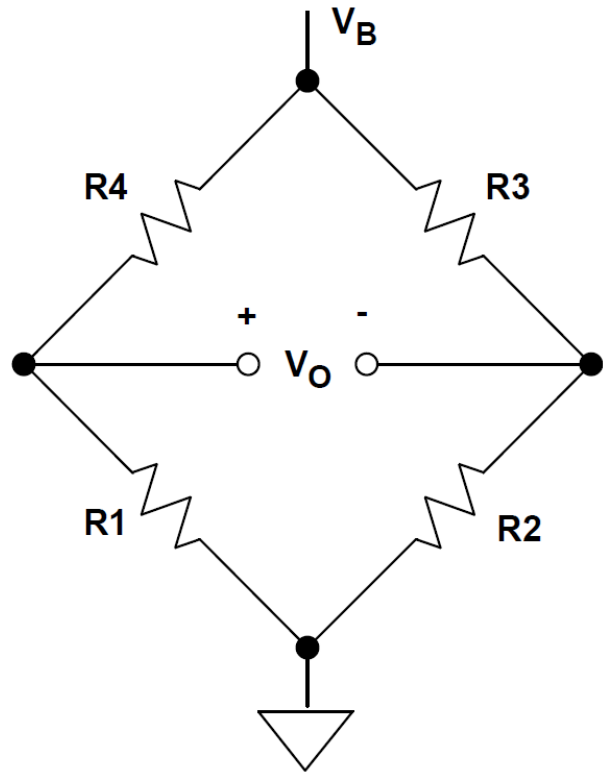
Мостовите схеми предлагат много добра възможност за точно измерване на малки промени в съпротивлението. Основният мост на Wheatstone (всъщност разработен от S. H. Christie през 1833 г.) се състои от четири резистора, свързани като четириъгълник, източник на възбуждане (напрежение или ток), свързан към един от диагоналите, и детектор на напрежение, свързан към другия диагонал. Детекторът измерва разликата между изходите на два делителя на напрежение, свързани през възбуждането.

С мостовата схема съпротивлението се измерва индиректно чрез сравнение с подобно съпротивление. Двата основни начина на работа с мостови схеми са като нулев детектор или чрез измерване на напрежение, пропорционално на разликата в съпротивлението.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Мостови схеми за измерване на активно съпротивление



$$V_O = \frac{R1}{R1 + R4} V_B - \frac{R2}{R2 + R3} V_B$$

$$= \frac{\frac{R1}{R4} - \frac{R2}{R3}}{\left(1 + \frac{R1}{R4}\right) \left(1 + \frac{R2}{R3}\right)} V_B$$

БАЛАНС

$$V_O = 0 \text{ при } \frac{R1}{R4} = \frac{R2}{R3}$$

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Мостови схеми за измерване на активно съпротивление

Когато  $R1/R4 = R2/R3$ , съпротивителният мост е уравновесен (нулиран), независимо от начина на възбуждане (ток или напрежение, АС или DC), големината на възбуждането, режима на отчитане (ток или напрежение) или импеданса на детектора. Следователно, ако съотношението  $R2/R3$  е фиксирано на  $K$ , уравновесяване се постига, когато  $R1 = KR4$ . Ако  $R1$  е неизвестно и  $R4$  е точно определено променливо съпротивление, може да се намери стойността на  $R1$  чрез регулиране на  $R4$ , докато се постигне равновесие. Обратно, при измервания от сензорен тип,  $R4$  може да бъде фиксирана еталонна стойност и нула възниква, когато величината на външната променлива (напрежение, температура и т.н.) е такава, че  $R1 = KR4$ .

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Мостови схеми за измерване на активно съпротивление

Нулевите измервания се използват основно в системи за обратна връзка, включващи електромеханични елементи и/или намеса на човешки фактор. Такива системи се стремят да принудят активния елемент (тензодатчик, терморезистор, термистор и т.н.) да балансира моста, като повлияе на измервания параметър.

За по-голямата част от сензорните приложения, използващи мостови схеми, отклонението на един или повече резистора в моста от първоначалната стойност се измерва като стойност за големината (или нейната промяна) на измерваната променлива. В този случай промяната на изходното напрежение е индикация за промяна на съпротивлението. Тъй като много малки промени в съпротивлението са често срещани, промяната на изходното напрежение може да бъде толкова малка, например десетки милivolта, дори при  $V_B = 10\text{ V}$  (типично напрежение на възбуждане при приложение на тензометрична клетка).

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Мостови схеми за измерване на активно съпротивление

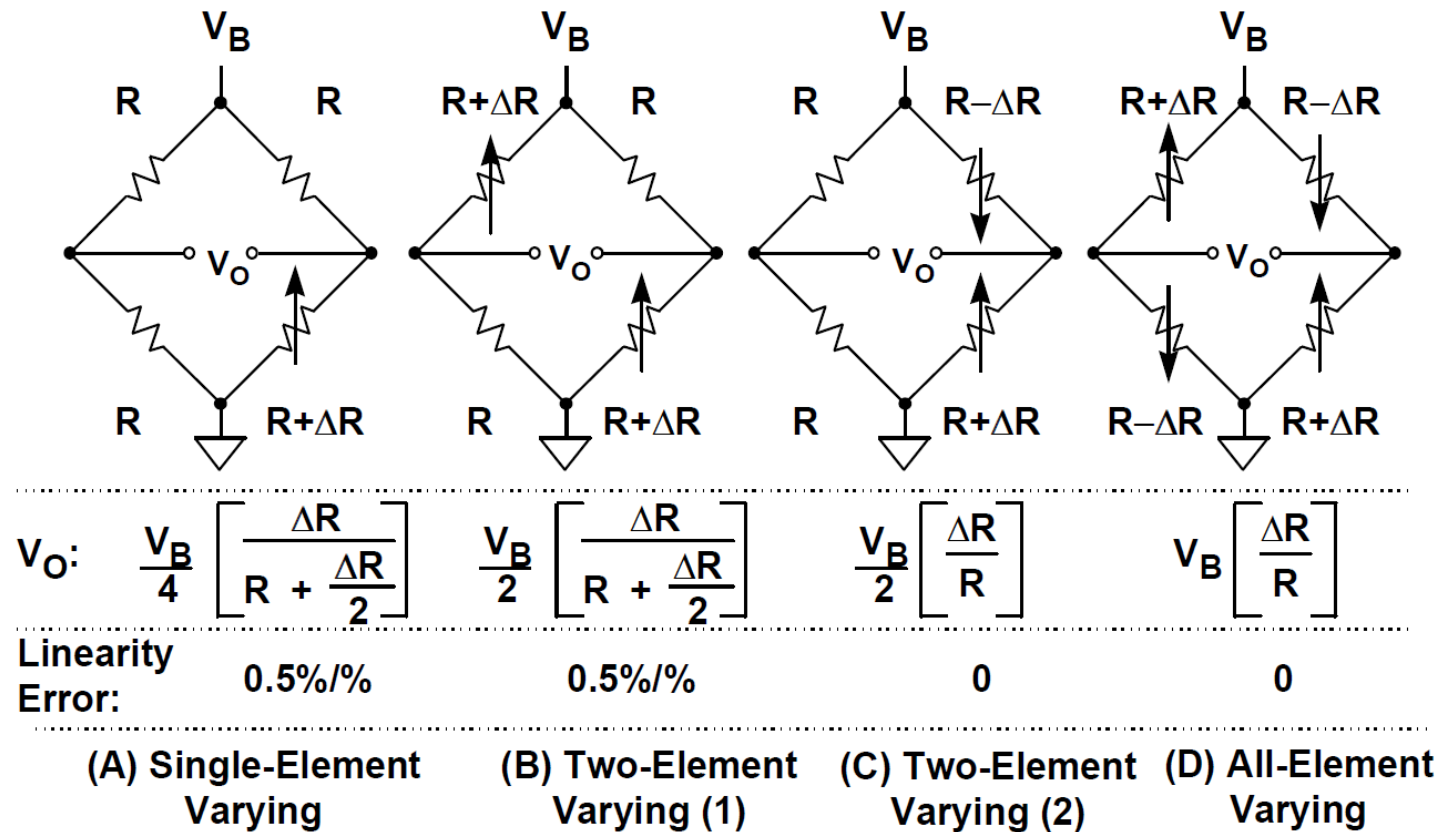
В много мостови приложения може да има два или дори четири променливи елемента. В този случай се приема възбуждане с постоянно напрежение,  $V_B$ . Тъй като изходното напрежение на моста е право пропорционално на  $V_B$ , точността на измерване не може да бъде по-добра от тази на точността на възбуждащото напрежение.

Във всеки случай фиксираната стойност на резистора,  $R$ , е избрана да бъде равна на номиналната стойност на променливия резистор(и). Отклонението на променливия(ите) резистор(и) спрямо номиналната стойност е пропорционално на измерваната величина, като деформация (в случай на тензодатчик) или температура (в случай на терморезистор).

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Мостови схеми за измерване на активно съпротивление



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Мостови схеми за измерване на активно съпротивление

Чувствителността на моста е отношението на максималната очаквана промяна на изходното напрежение към напрежението на възбуждане. Например, ако  $V_B = 10V$  и максималното изходно напрежение на моста е  $10mV$ , тогава чувствителността е  $1mV/V$ .

Типичната чувствителност на моста е от  $1mV/V$  до  $10mV/V$ . Въпреки че големите напрежения на възбуждане водят до пропорционално по-големи максимални изходни напрежения, те също водят до по-голямо разсейване на мощност и са възможни грешки от самонагриване на сензорния резистор. От друга страна, ниските стойности на напрежението на възбуждане изискват по-голямо усилване в схемите за обработване и повишават чувствителността към шум.



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Мостови схеми за измерване на активно съпротивление

Мост с един променлив елемент е най-подходящ за измерване на температура с помощта на терморезистори или термистори. Тази конфигурация се използва и с един резистивен тензодатчик.

Има две възможности за разглеждане на случая при мост с два променливи елемента. В първия, случай (1), и двата елемента се променят в една и съща посока, като например два идентични тензодатчика, монтирани в съседство един с друг с успоредни оси. Случай (2) разглежда два идентични елемента, които варират в противоположни посоки. Това може да съответства на два идентични тензодатчика: единият е монтиран отгоре на огъваща се повърхност и един отдолу. Мостът с два променливи елемента обикновено се използва в сензори за налягане и разходомери.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Мостови схеми за измерване на активно съпротивление

Втората конфигурация на мост с два променливи елемента, Случай (2), изисква два идентични елемента, които се променят в противоположни посоки. Това може да съответства на два идентични тензодатчика: единият е монтиран отгоре на огъваща се повърхност и един отдолу.

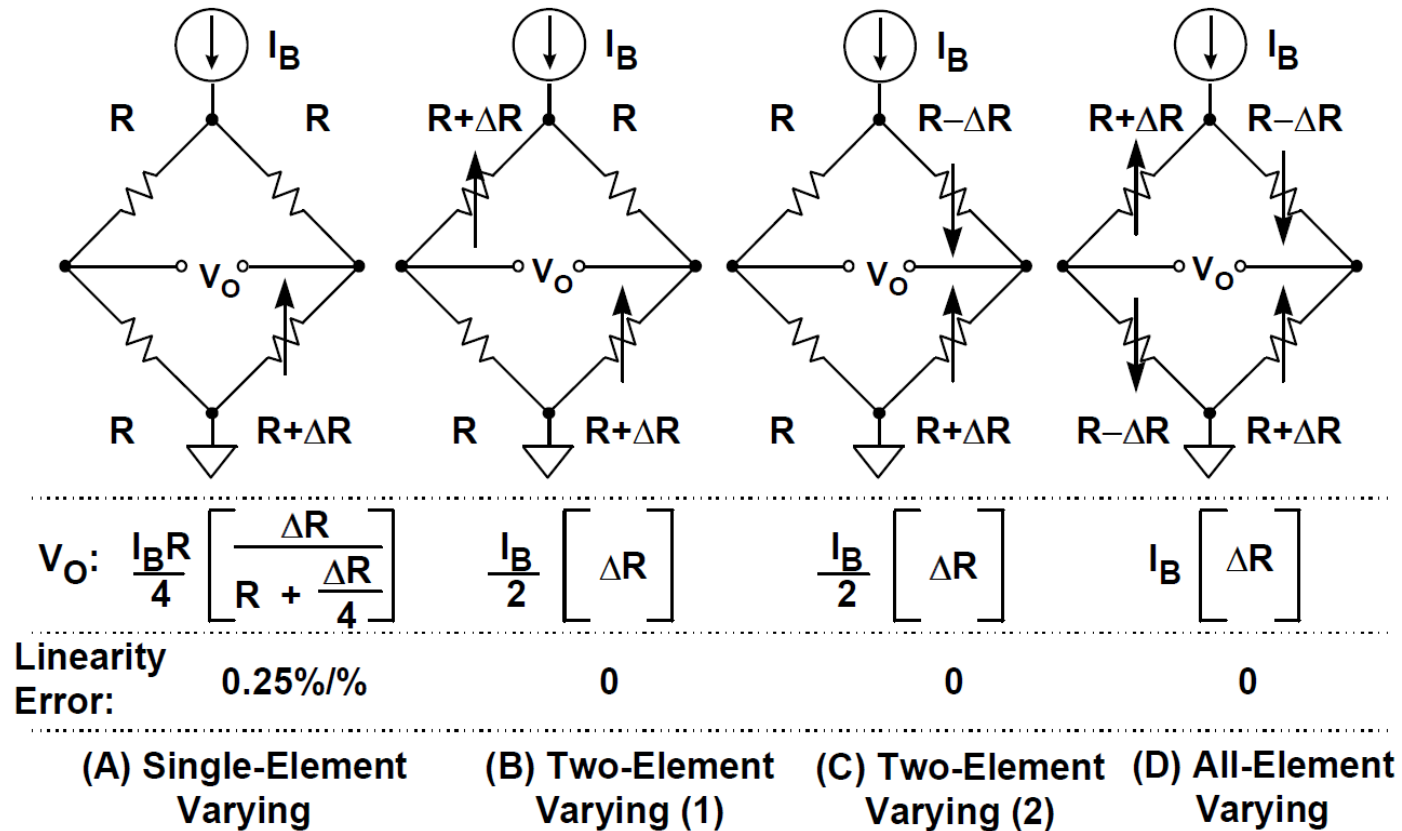
Мостът с всички променливи елементи произвежда най-голям сигнал за дадена промяна на съпротивлението и по своята същност е линеен. Това е стандартна индустриална конфигурация за динамометрични клетки, които са изградени от четири идентични тензодатчика.

Мостовете могат също да се възбуждат от източници на постоянен ток. Токовото възбуждане, което не е толкова популярно като напрежителното, има предимство, когато мостът е разположен отдалечено от източника на възбуждане, тъй като съпротивлението на проводниците не въвежда грешки в измерването.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

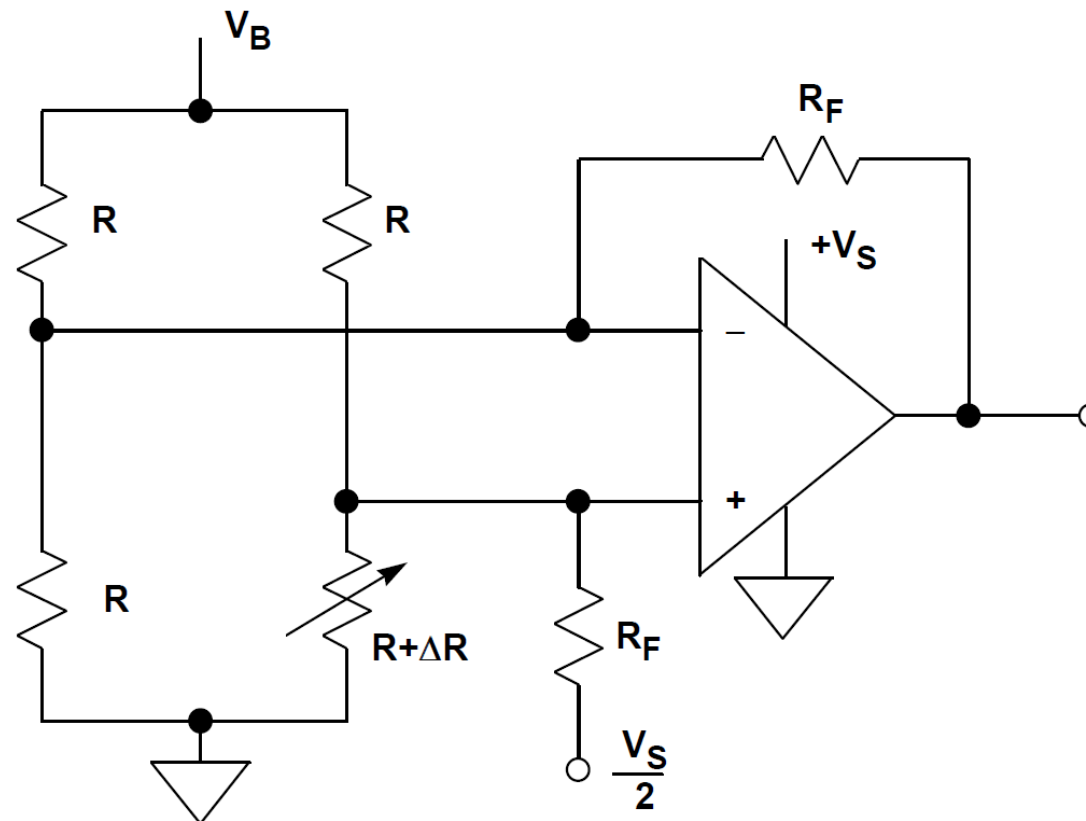
Мостови схеми за измерване на активно съпротивление



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Усилване на изходното напрежение на мостови схеми



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Усилване на изходното напрежение на мостови схеми

Изходното напрежение на мост с един променлив елемент може да бъде усилено от единичен прецизен операционен усилвател, свързан като инвертиращ. Тази схема, макар и проста, има малка точност на усиляването и също така дисбалансира моста поради натоварване от  $R_F$  и входния поляризиращ ток на операционния усилвател. Резисторите  $R_F$  трябва да бъдат внимателно подбрани и съчетани, за да се увеличи максимално коефициента на потискане на синфазния сигнал (CMRR). Също така е трудно да се максимизира CMRR, като в същото време се използват различни опции за усиляване. Освен това изходът е нелинеен. Основната положителна характеристика на схемата е, че тя може да работи с едно захранване и изисква един операционен усилвател. Затова резисторът  $R_F$  е свързан между неинвертиращия вход и  $V_S/2$  (а не към земята), така че да могат да се поемат както положителните, така и отрицателните стойности на  $\Delta R$ , а изходът на операционния усилвател се отнася към  $V_S/2$ .

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

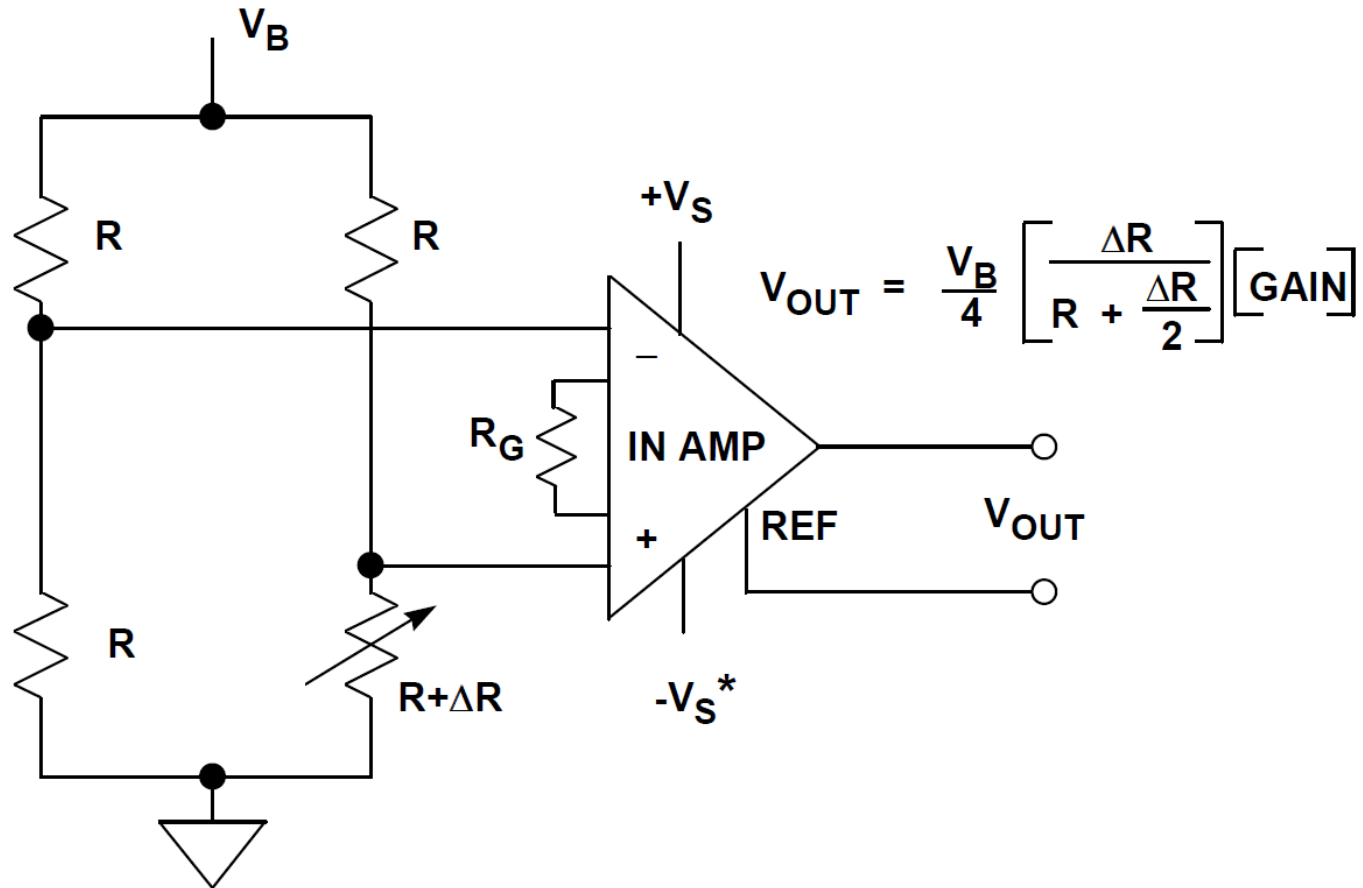
### Усилване на изходното напрежение на мостови схеми

Много по-добър подход е да се използва инструментален усилвател (in-amp). Тази ефективна схема осигурява по-добра точност на усилването (обикновено се настройва с единичен резистор,  $R_G$ ) и не дебалансира моста. Отлично потискане на синфазния сигнал може да се постигне с модерни инструментални усилватели. Поради присъщите характеристики на моста, изходът е нелинеен, но това може да бъде коригирано в софтуера (приемайки, че изходът на входния усилвател е дискретизиран с помощта на аналогово-цифров преобразувател и последван от микроконтролер или микропроцесор). Инструментални усилватели като AD620, AD623 и AD627 могат да се използват в приложения с едно захранване, при условие че се спазват ограниченията за усилването и промените на входното и изходното напрежение.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Усилване на изходното напрежение на мостови схеми



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Усилване на изходното напрежение на мостови схеми

Съществуват различни техники за линеаризиране на мостове, но е важно да се прави разлика между линейността на предавателната характеристика на моста и линейността на реакцията на сензора към изменението на физическата величина. Например, ако активният елемент е терморезистор, мостът, използван за осъществяване на измерването, може да има напълно адекватна линейност, но изходът все още може да бъде нелинеен поради нелинейността на сензора. За преодоляването на проблема с нелинейността има различни начини, включително запазване на малки резистивни колебания в моста, формиране на допълнителна нелинейна реакция в активните елементи на моста, използване на резистивни настройки за корекции от първи ред и други.



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

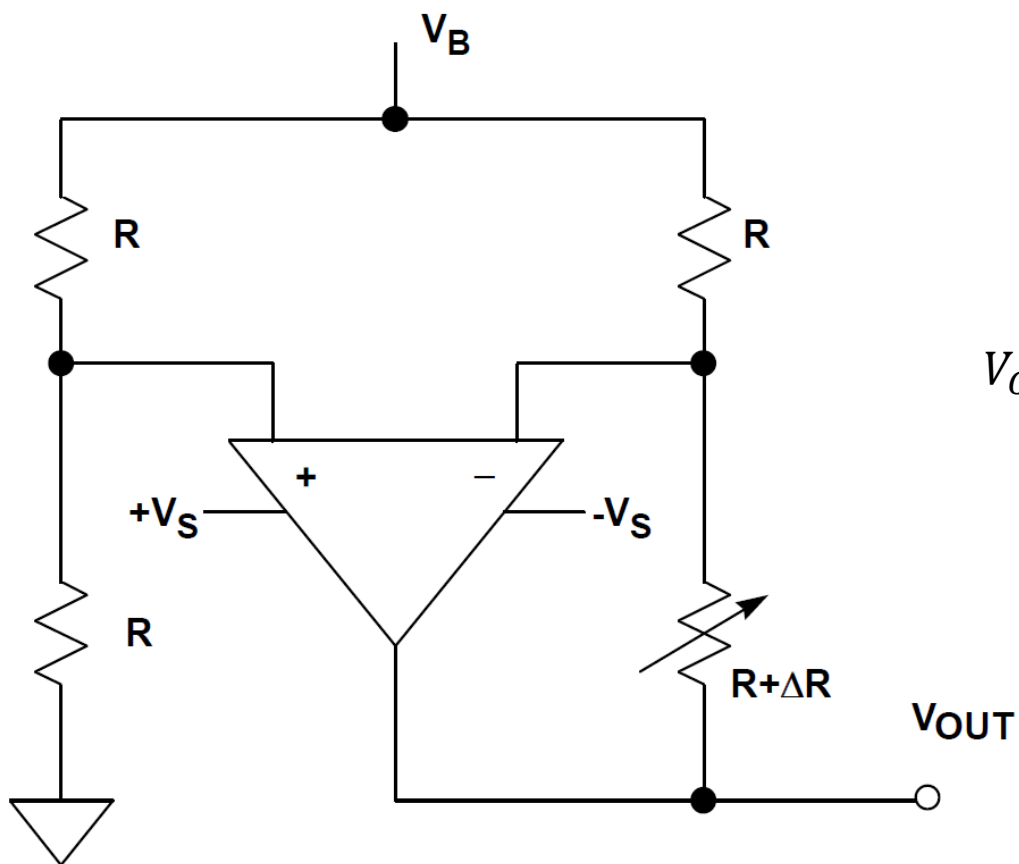
### Усилване на изходното напрежение на мостови схеми

В схемата на активен мост с един променлив елемент операционният усилвател формира принудителна нула чрез добавяне на напрежение последователно с променливото рамо. Това напрежение е равно по големина и противоположно по поляритет на нарастващото напрежение в променливия елемент и е линейно с  $\Delta R$ . Тъй като това е изход на операционен усилвател, той може да се използва като изходна точка с нисък импеданс за измерване на моста. Този активен мост има усилване два пъти по-голямо от стандартния мост с един променлив елемент и изходът е линеен, дори за големи стойности на  $\Delta R$ . Поради малкия изходен сигнал, този мост обикновено трябва да бъде последван от втори усилвател. Усилвателят, използван в тази схема, изисква двойно захранване, тъй като изходът му трябва да бъде отрицателен.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Усилване на изходното напрежение на мостови схеми

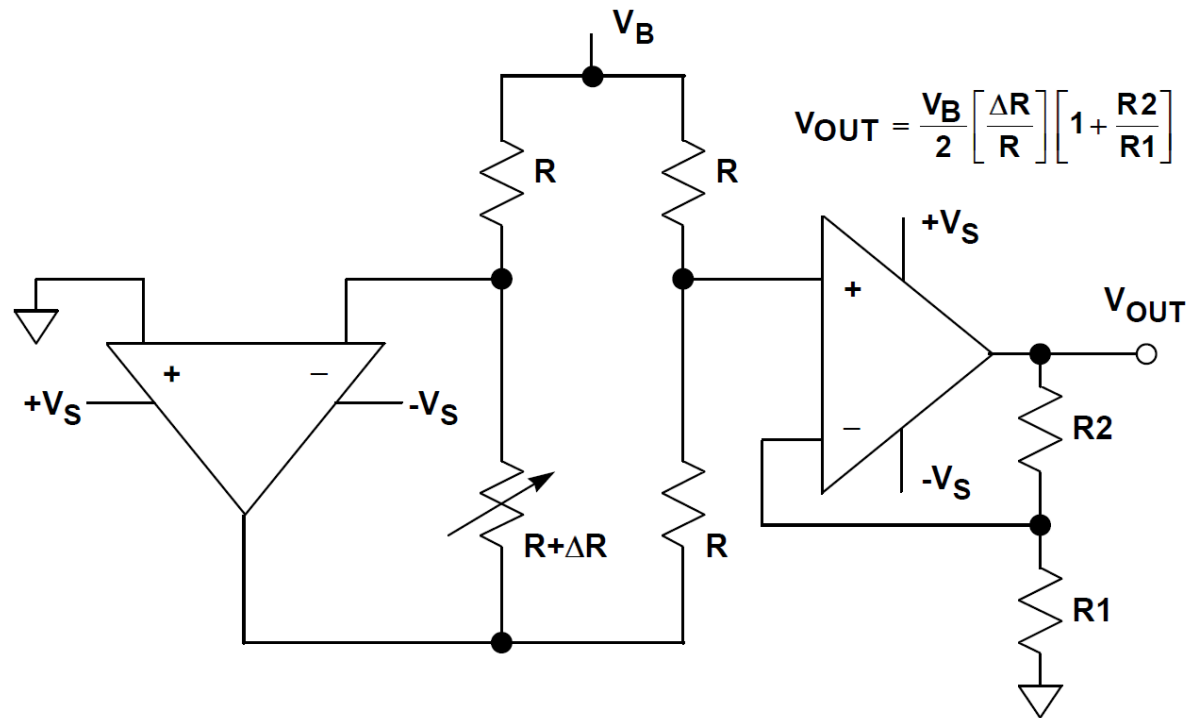


$$V_{OUT} = \frac{V_B}{2} \left( 1 + \frac{R + \Delta R}{R} \right) - V_B \frac{R + \Delta R}{R} = -V_B \frac{\Delta R}{2R}$$

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Усилване на изходното напрежение на мостови схеми



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

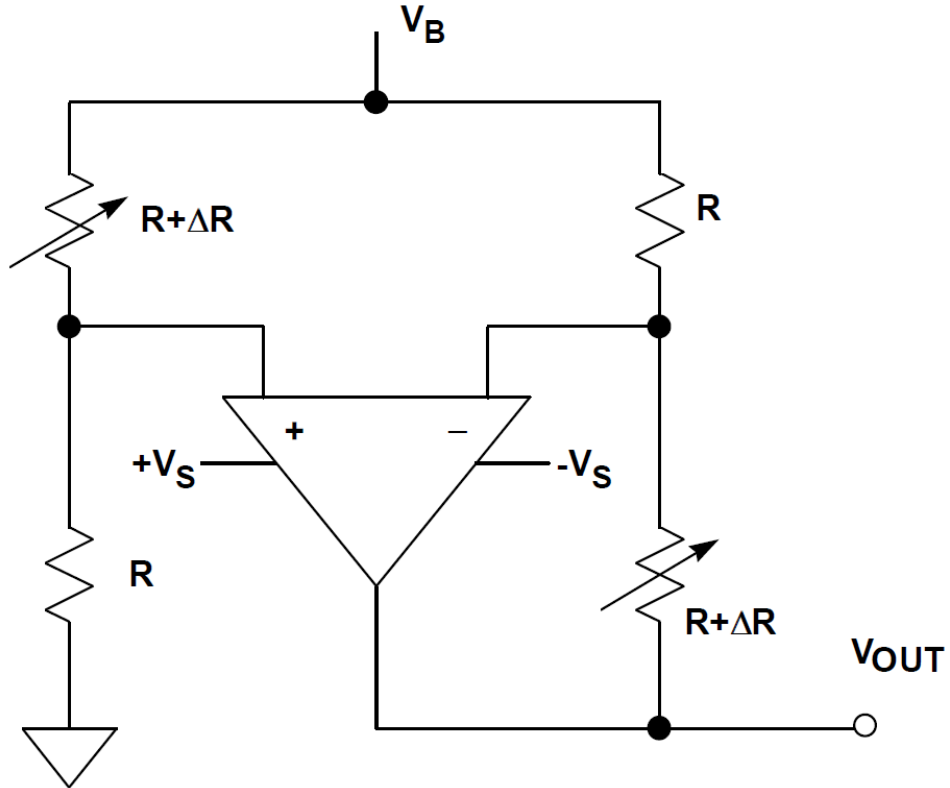
Усилване на изходното напрежение на мостови схеми

Схемата е за линеаризиране на мост с един променлив елемент. Операционният усилвател поддържа постоянен ток в елемента с променливо съпротивление. Изходният сигнал се взема от десния извод на моста и се усилва от неинвертиращ операционен усилвател. Изходът е линеен, но схемата изисква два операционни усилвателя, които трябва да работят с двуполярно захранване. Също така  $R1$  и  $R2$  трябва да бъдат съгласувани за точно усилване.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Усилване на изходното напрежение на мостови схеми



$$V_{OUT} = V_B \frac{R}{2R + \Delta R} \left( 1 + \frac{R + \Delta R}{R} \right) - V_B \frac{R + \Delta R}{R} = -V_B \frac{\Delta R}{R}$$

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Усилване на изходното напрежение на мостови схеми

Схемата е за линеаризиране на възбуден с напрежение мост с два променливи елемента. Тази схема има два пъти по-голяма чувствителност. Необходим е операционен усилвател с двуполярно захранване. Може да е необходимо допълнително усилване.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

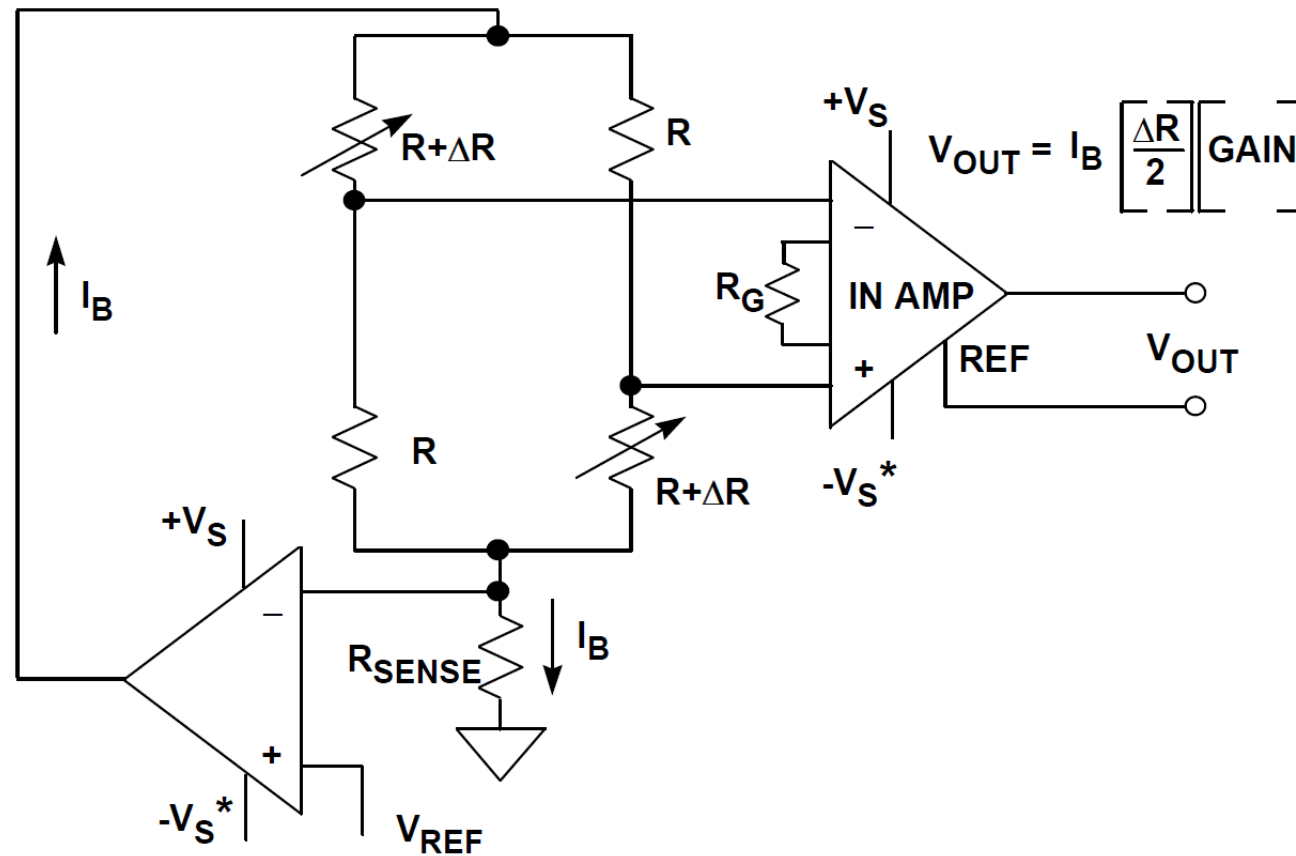
### Усилване на изходното напрежение на мостови схеми

Мостовата схема с два променливи елемента използва операционен усилвател, токоопределящ резистор и еталонно напрежение за поддържане на постоянен ток през моста ( $I_B = V_{REF}/R_{SENSE}$ ). Токът през всяка страна на моста остава постоянен ( $I_B/2$ ), тъй като съпротивленията се променят по еднакъв начин, следователно изходът е линейна функция на  $\Delta R$ . Инструментален усилвател осигурява допълнително усилване. Тази схема може да работи с едно захранване с правилния избор на усилватели и нива на сигнала.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Усилване на изходното напрежение на мостови схеми



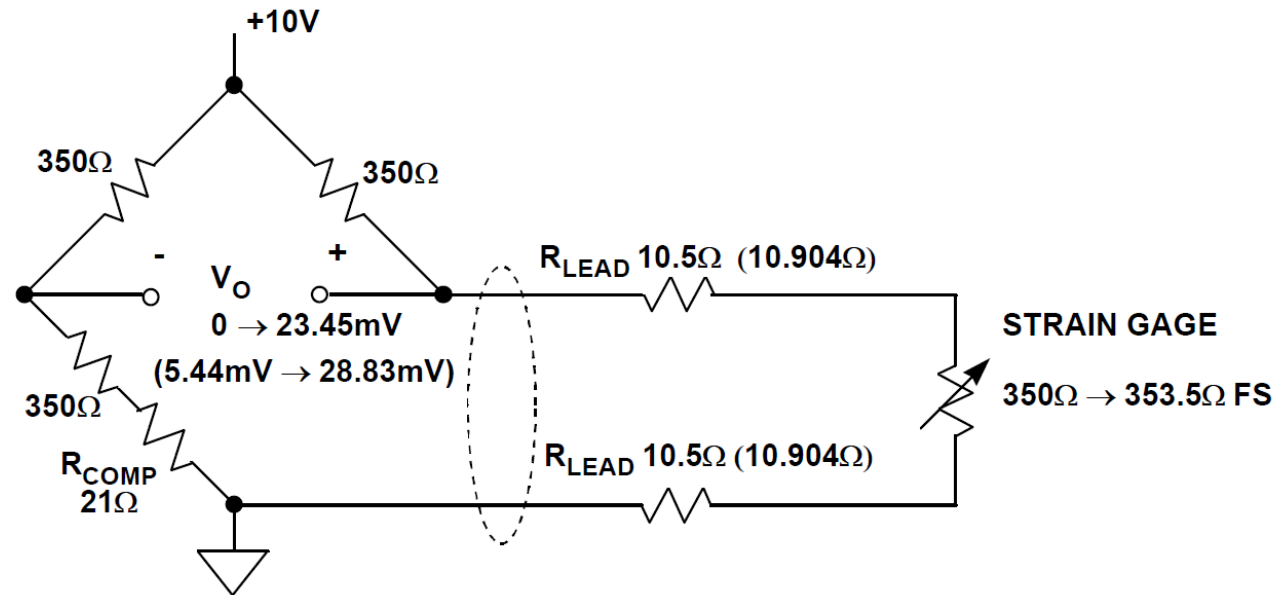


# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Влияние на свързващите проводници при мостови схеми

Съпротивлението на свързващите проводници е важен проблем при използване на отдалечени мостове.



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Влияние на свързващите проводници при мостови схеми

Тензодатчик с номинално съпротивление  $350\Omega$  е свързан към останалата част от мостовата схема чрез усукана двойка меден проводник. Съпротивлението на проводника е  $10,5\Omega$ . Следователно общото съпротивление на свързващите проводници с тензодатчика със съпротивление  $350\Omega$  е  $21\Omega$ .

Добавянето на резистор  $R_{COMP}$  със съпротивление  $21\Omega$  компенсира съпротивлението на свързващите проводници и балансира моста, когато съпротивлението на тензодатчика е  $350\Omega$ .

Ако се приеме, че температурата на свързващите проводници се е повишила с  $+10^{\circ}\text{C}$  над номиналната стойна температура, увеличението на общото съпротивление на проводниците ще се повиши с  $+0,404\Omega$ .

Това отместване може да бъде компенсирано и в софтуера.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Влияние на свързващите проводници при мостови схеми

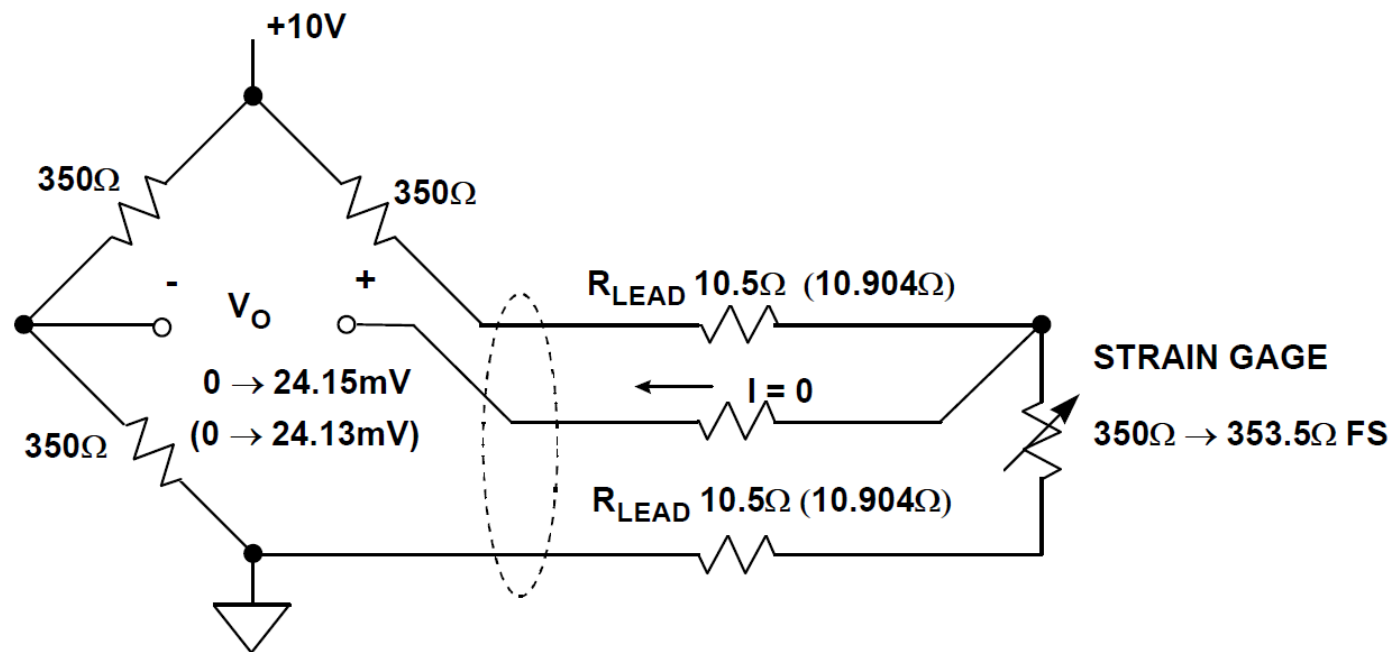
Грешките от съпротивлението на свързващите проводници върху изходното напрежение на моста могат да бъдат сведени до минимум чрез 3-проводна връзка. Предполага се, че изходното напрежение на моста се измерва от устройство с високо входно съпротивление, следователно няма да тече ток в сензорния проводник.

Трипроводният метод работи добре за отдалечено разположени резистивни елементи, които съставляват едната страна на мост с един променлив елемент.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Влияние на свързващите проводници при мостови схеми



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Влияние на свързващите проводници при мостови схеми

Много често мостовете с всички променливи елементи обикновено представляват цялостен комплект, както в случая на динамометрична клетка. Когато тези мостове са отдалечени от схемата за аналогова обработка, трябва да се използват специални техники за поддържане на точността.

От особено значение е поддържането на точността и стабилността на напрежението на възбуждане на моста. Изходното напрежение на моста е право пропорционално на напрежението на възбуждане и всяко отклонение в напрежението на възбуждане предизвиква съответно отклонение в изходното напрежение.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

### Влияние на свързващите проводници при мостови схеми

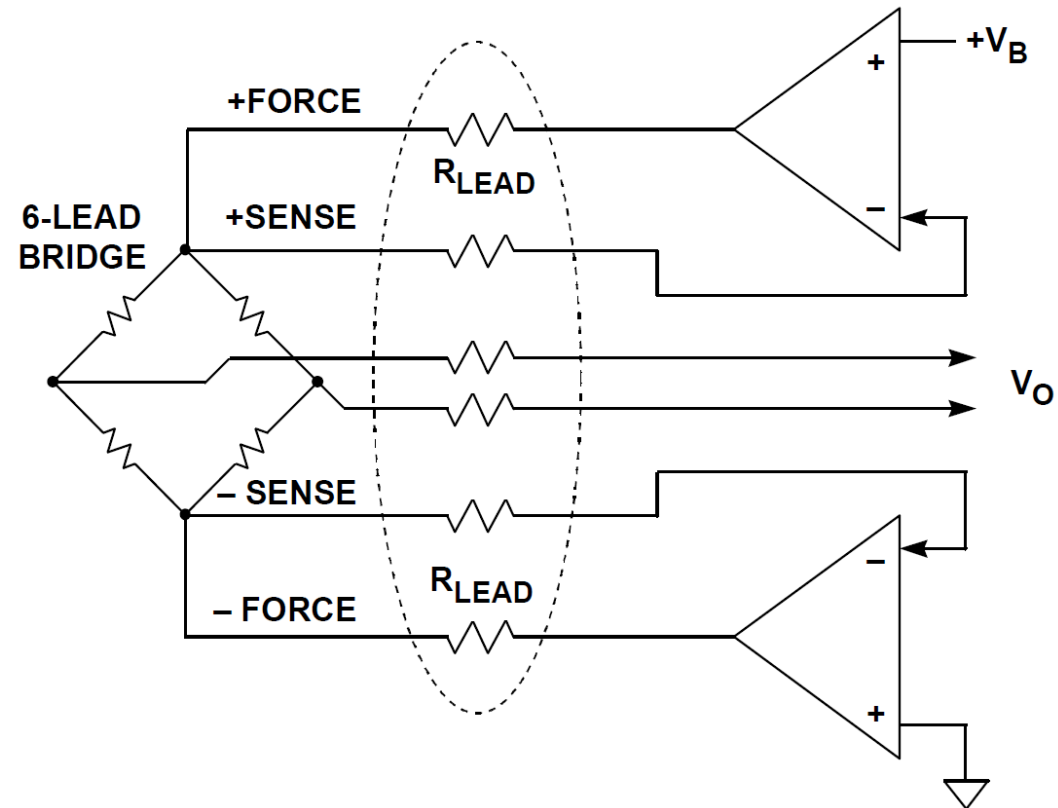
Поради тази причина се прилага 4-проводен метод (метод на Келвин). Повечето мостове с всички променливи елементи (като динамометрични клетки) имат шест извода: два извода за изходното напрежение на моста, два извода за възбуждането на моста и два сензорни извода. Сензорните изводи постъпват към входове на операционни усилватели с висок импеданс, като по този начин има минимална грешка, дължаща се на индуцирания от тока на поляризация пад на напрежението в съпротивлението на проводника. Операционните усилватели поддържат необходимото напрежение на възбуждане, за да бъде напрежението, измерено между сензорните проводници, винаги равно на  $V_B$ .

Въпреки че методът на Келвин елиминира грешки, дължащи се на пада на напрежението в съпротивлението на проводниците, възбудителните напрежения трябва да са много стабилни, тъй като те пряко влияят на изходното напрежение на моста. Също така, операционните усилватели трябва да имат малък офсет, малък дрейф и нисък шум.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Влияние на свързващите проводници при мостови схеми

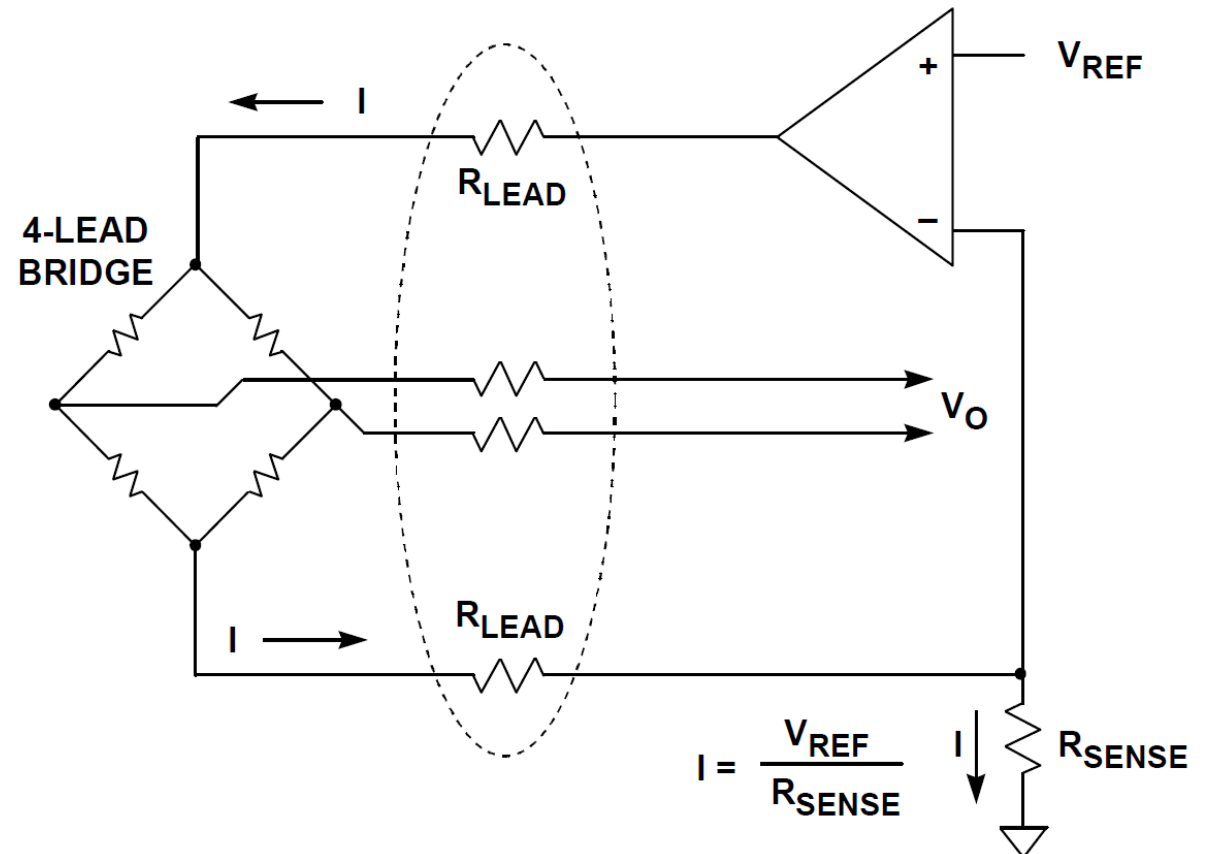


# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Влияние на свързващите проводници при мостови схеми

Методът на възбуждане с постоянен ток, също се използва за минимизиране на грешките от съпротивлението на проводниците върху точността на измерване. Въпреки това, точността на еталонното напрежение, токоопределящия резистор и операционния усилвател влияят върху общата точност.





# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

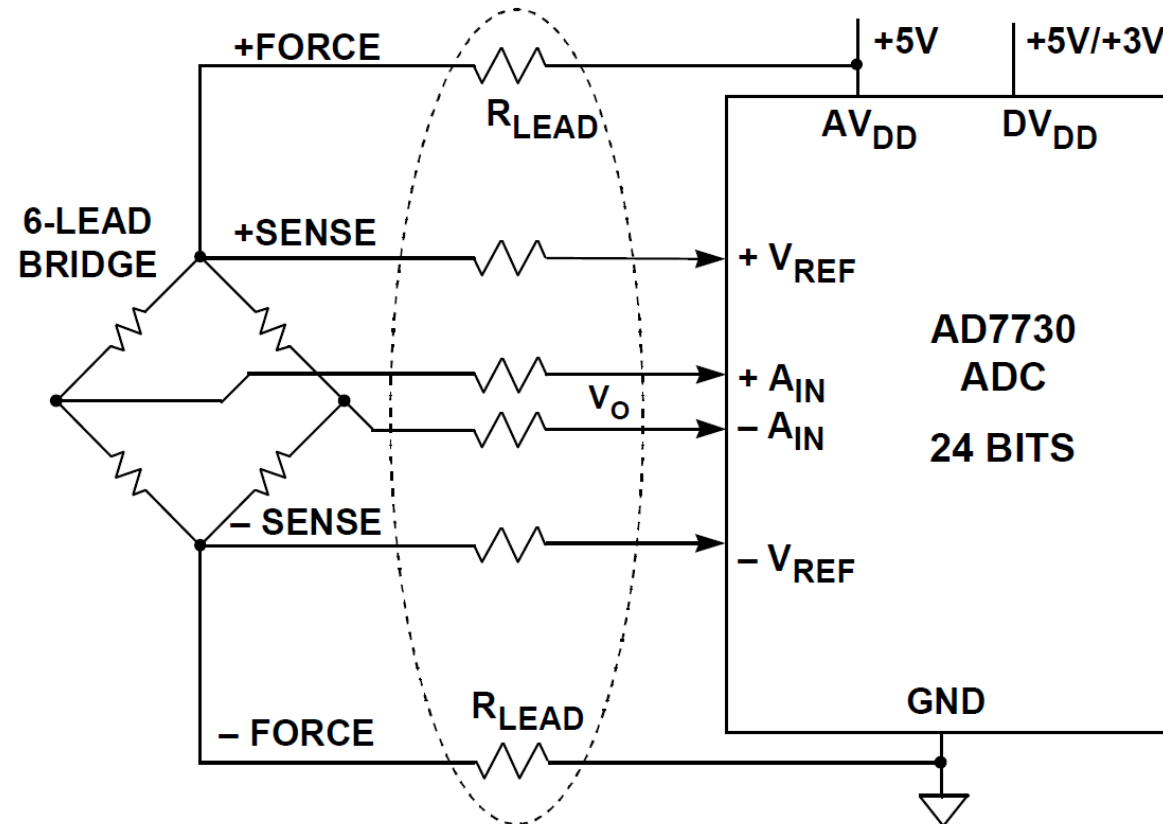
### Влияние на напрежението на възбуждане при мостови схеми

Минимизиране на грешките, дължащи се на съпротивлението на проводниците, а също така елиминиране необходимостта от точно възбуждащо напрежение може да се постигне с използване на аналогово-цифров преобразувател с диференциални входове и за входното, и за опорното напрежение. Подобна схема е AD7730, която работи с едно захранващо напрежение, и то също така се използва за възбуждане на отдалечения мост. И аналоговият вход, и входът за опорно напрежение на АЦП са с висок импеданс и напълно диференциални. Чрез използване на изходите + и – SENSE от моста като диференциално опорно напрежение към АЦП няма загуба на точност при измерване, ако действителното напрежение на възбуждане на моста варира.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Влияние на напрежението на възбуждане при мостови схеми



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

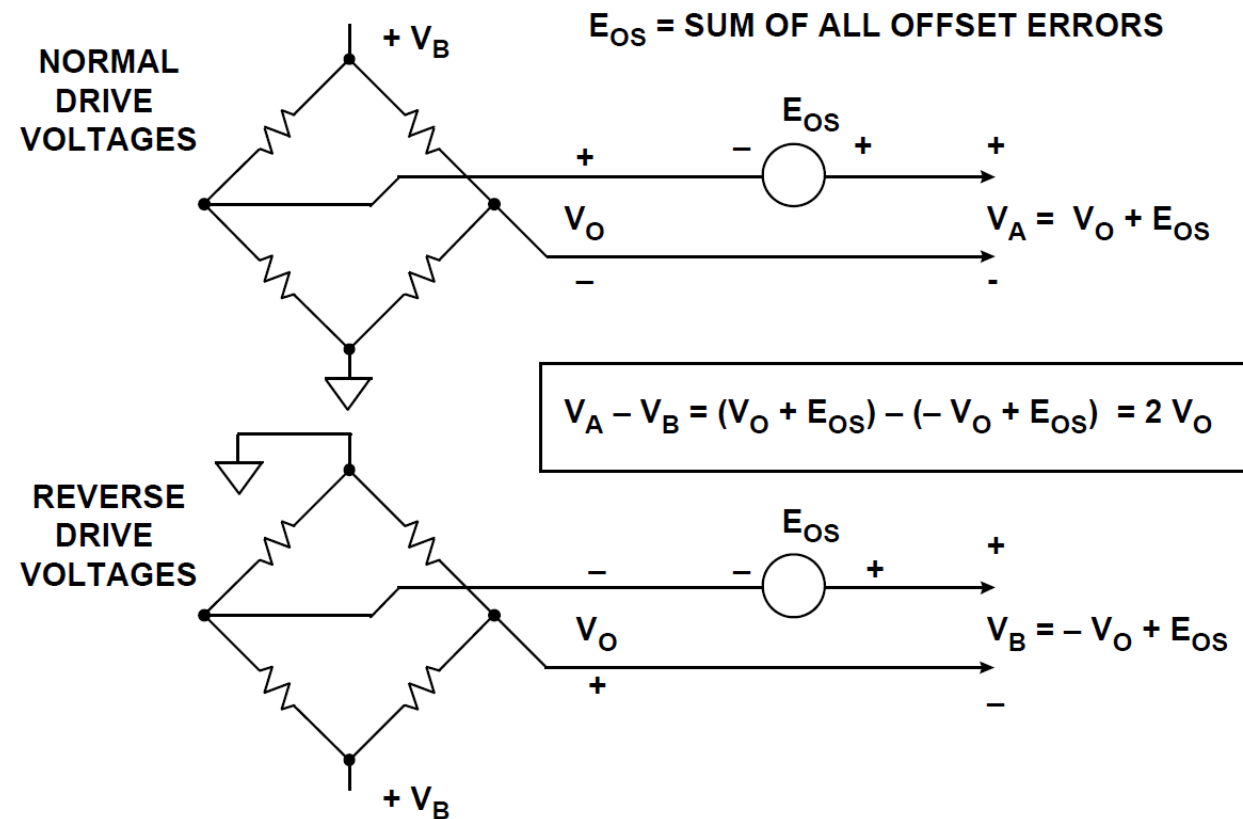
### Компенсиране на постояннотоковите грешки при мостови схеми

Променливотоковото възбуждане на мостовите схеми може ефективно да премахне постояннотоковите грешки, явяващи се последователно с изходното напрежение на моста. Концепцията включва измерване на изходното напрежение на моста при две условия. Първото измерване дава резултат  $V_A$ , който е равен на сумата от търсеното изходно напрежение на моста  $V_O$  и напрежението на грешката от офсета  $E_{OS}$ . Полярността на мостовото възбуждане се обръща и се прави второ измерване  $V_B$ . Изваждането на  $V_B$  от  $V_A$  дава  $2V_O$  и напрежението на грешката от офсета  $E_{OS}$  се анулира.

# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

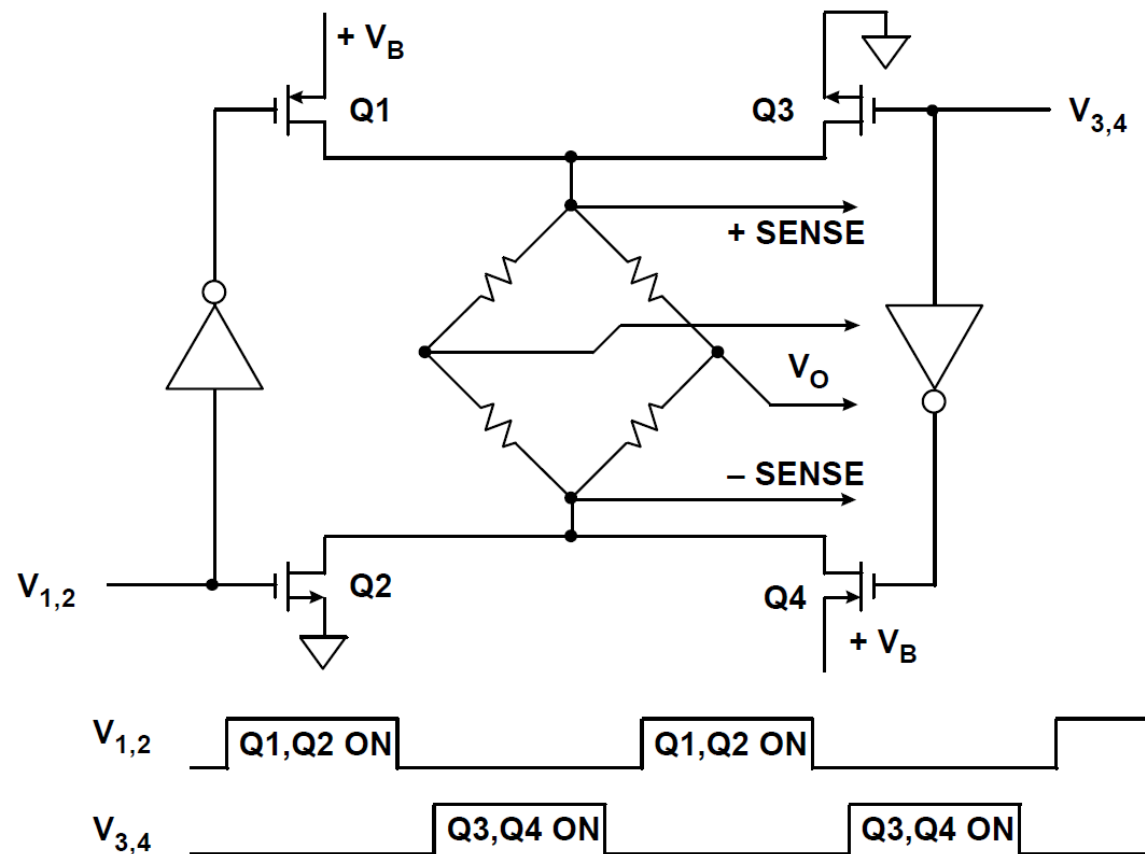
Компенсирание на постояннотоковите грешки при мостови схеми



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

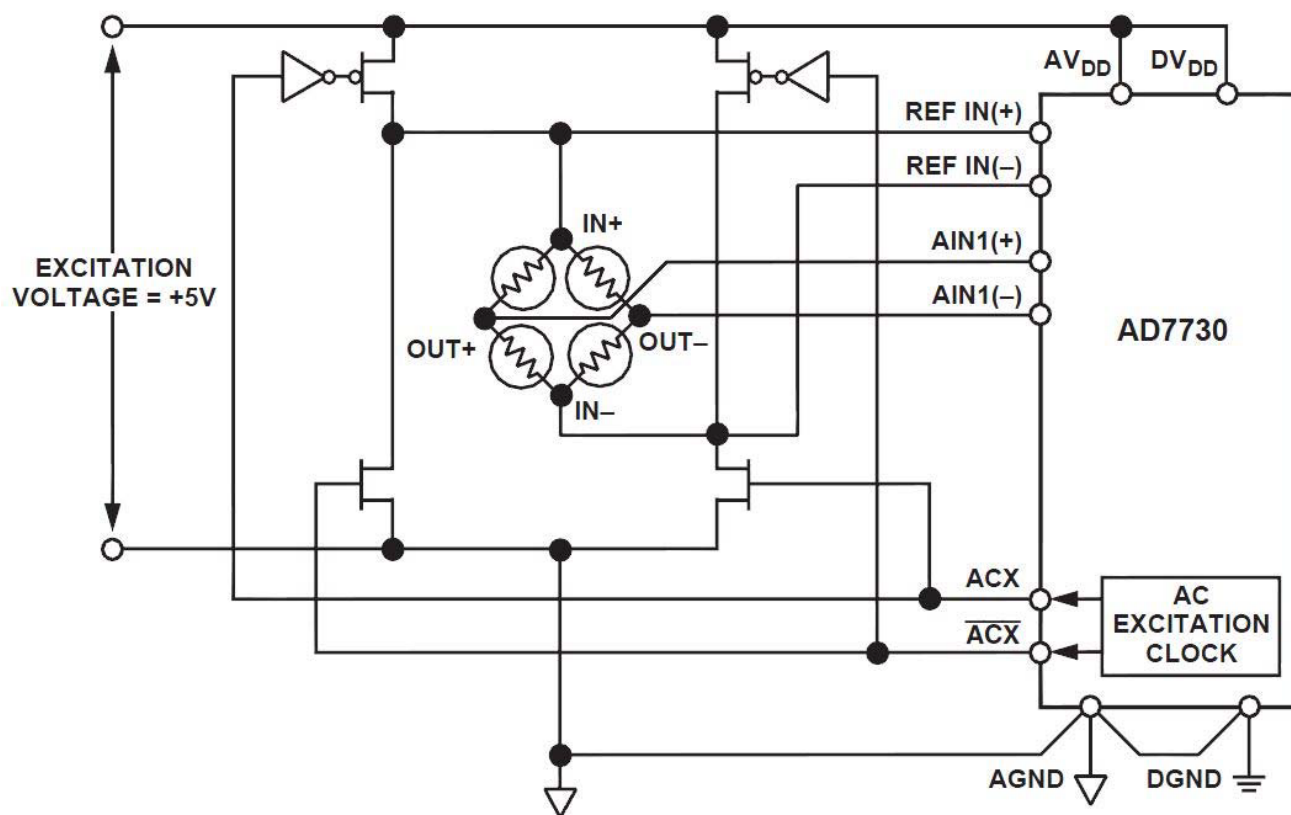
Компенсирание на постояннотоковите грешки при мостови схеми



# ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА РАБОТНАТА СРЕДА

## Съпротивителни сензори

Компенсирание на постояннотоковите грешки при мостови схеми



Към AD7730 е свързана мостова схема. Мостът е за измерване на различни величини с резистивни сензори. За компенсирание на **офсета** се променя поляритетът на захранването на моста (с ниска честота).