

Измерване на малки механични премествания.

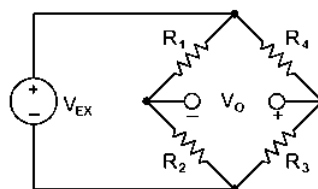
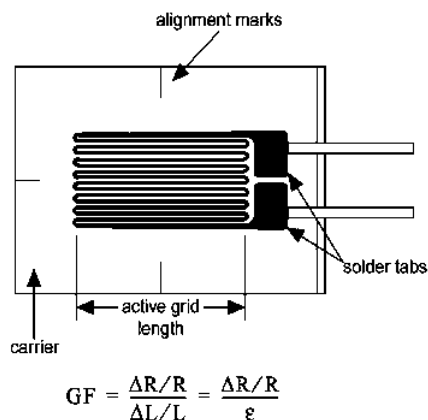
Измерването на “малки” механични премествания се използва освен директно в машиностроенето и косвено при контролирането на много други величини. Преди всичко дефиницията за “малки” не е много ясна. В случая става въпрос за механични премествания (или размери) които се отчитат с разрешаваща способност няколко микрона (0.1 – 10μm). Обикновено работният обхват е от един до няколко милиметра. При някои по-прецизни (еталонни) измервателни съоръжения обхватът е значително разширен и достига до 1-2 m. В тези случаи изискванията към условията при които се извършват измерванията са много сериозни – изисква се темпериране на измервателната стая в продължение на часове при поддържана температура с точност 0,1-0,2 С.

Принципите и съответно сензорите за малки премествания са много различни. Използват се съпротивителни, капацитивни, индуктивни, пиезо и други сензори. Много разпространени са и оптическите методи. За много малки премествания (измерване на вибрации) се използва интерференцията на светлината, както и мехатронни сензори които работят на принципа на радиоламтата (променя се разстоянието между катода и решетката). Според приложението се предпочитат едни или други сензори – например за измерване в машиностроенето се предпочитат индуктивни сензори, за измерване на сили и тегло – тензосензори, за налягане – капацитивни, индуктивни и тензосензори и т.н. Освен това изборът на сензор зависи и от обхвата в който се изменя величината и условията при които се работи.

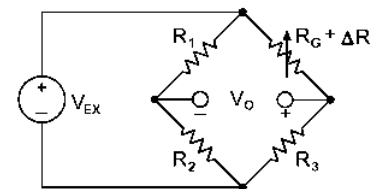
В допълнителните материали за подготовка са дадени подробности за различните методи и сензори. Тук се разглеждат накратко най-разпространените от тях.

Тензосензори:

Това са съпротивления които са чувствителни на деформация. При промяна на размерите им се променя съпротивлението вследствие на промяната на дължината и сечението на проводника от който са направени. Изработват се от материали с много малък (нулев) температурен коефициент. Конструкцията им е такава, че да са чувствителни само в една посока. Най-често се използват за измерване на деформации, а оттам и на сила, тегло, налягане и др. Обикновено те се залепват на подходящо място върху еластично еталонно тяло (гредата). При деформация тялото разтяга или свива тензосензора и от това се съди за силите които са предизвикали деформацията. За да няма остатъчна деформация на сензора (и на съпротивлението му) промените трябва да са сравнително малки – до няколко процента, като зависят от използваните материали и допустимата грешка. Много голямо внимание се отделя на залепването на сензора върху еластичното тяло за да няма приплъзване между тях. По долу е показан типичен тензосензор и зависимостите на изходния сигнал от деформациите при свързване в мостова схема.



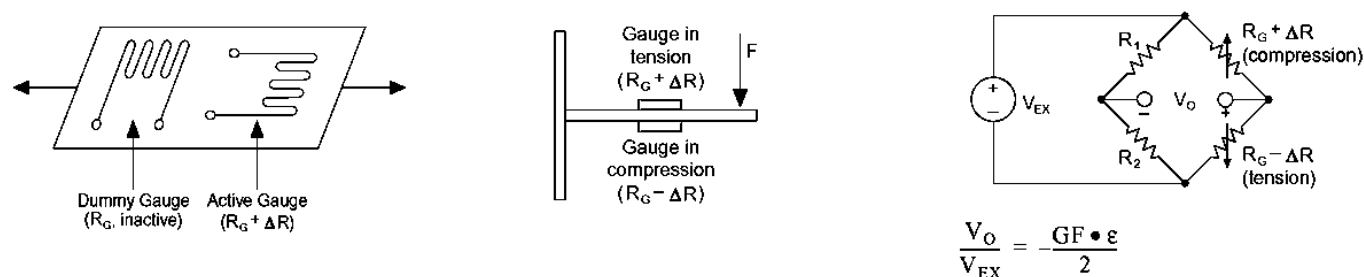
$$V_0 = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{EX}$$



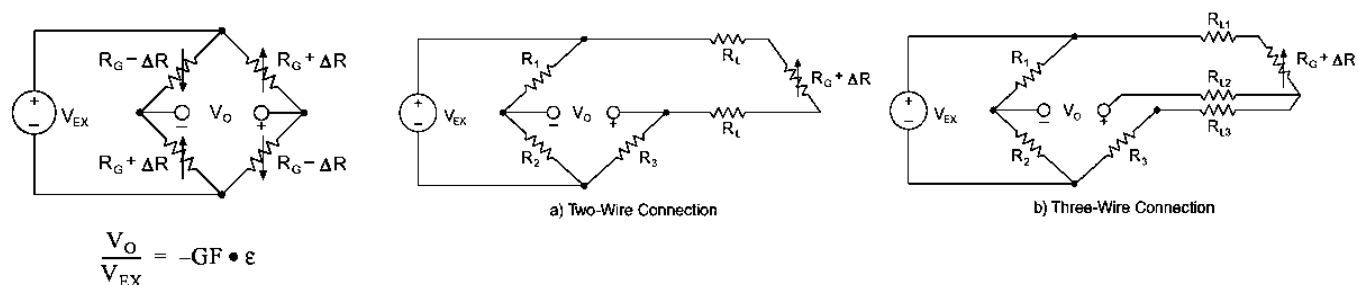
$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{GF \cdot \epsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF \cdot \frac{\epsilon}{2}} \right)$$

Изискванията към електронните устройства за работа с тензосензори са аналогични на тези за работа с мостови схеми със сензори с малка чувствителност. Освен това има и някои специфични особености – използване на компенсиращ тензорезистор (Dummy Gauge) който е част от измервателния мост, но е разположен така, че не се деформира, а само компенсира влиянието на

синфазните смущения (температура). За по-добра линейност и чувствителност се използват два тензорезистора – единият се разтяга, а другият се свива.



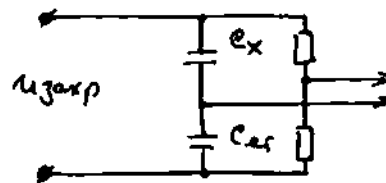
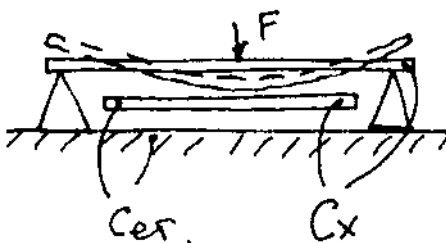
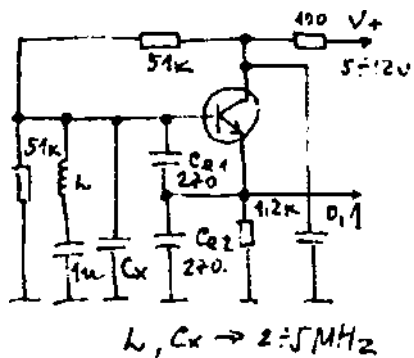
Най-голяма чувствителност се получава когато се използват четири тензорезистора образувачи мост – два от тях се свиват, два разтягат. Когато се използват единични сензори се налага да се работи по три или четири-проводна схема за компенсация на съпротивлението на свързващите проводници защото обикновено собственото съпротивление на тензосензорите не е голямо.



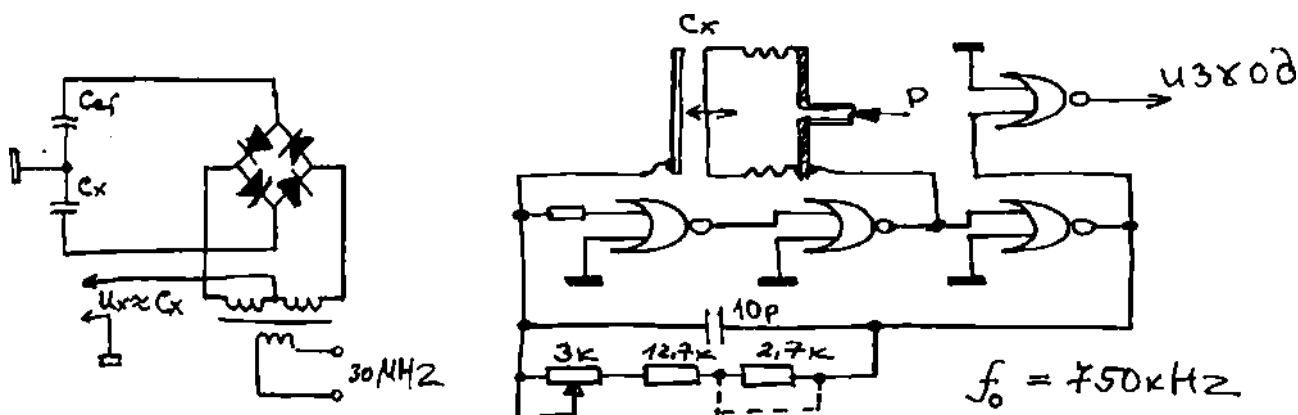
Много добри параметри имат полупроводниковите тензосензори. Най-често те се използват за измерване на налягане. Обикновено представляват четири раменен мост при който два по два резисторите се променят в различна посока. Така се получава по-добра линейност, по-висока чувствителност и се компенсират синфазните смущения (температура). Тези сензори се предлагат в няколко разновидности – компенсирани, некомпенсирани, с термосензор и др. При тези които са компенсирани в заводски условия се балансира мостът и се добавя схема за компенсация на чувствителността от температурата. Компенсацията включва лазерна настройка на резисторите и управление на захранващото напрежение на моста от температурата. При некомпенсирани (те са значително по-евтини) мерките за компенсация се вземат в електрониката. Когато се използват микроконтролери резултатите при използване на некомпенсирани сензори са по-добри, естествено за сметка на индивидуалната настройка на всеки сензор. Когато има и вграден термосензор (диод) външната компенсация дава още по-добри резултати.

Капацитивни сензори:

Този тип сензори използват зависимостта на капацитета на кондензатор от площта на пластинките или разстоянието между тях. Обикновено за по-малки премествания се използват сензори при които се променя разстоянието между пластинките, а при по-големи – площта. Вторите имат значително по-сложна механична конструкция. По отношение на схемите за измерване двата вида сензори са еднакви. Трябва да се отчита и това, че капацитетът зависи и от диелектричната проницаемост и ако тя се промени ще се получи грешка. Това налага да се прави компенсация. На фигурата по-долу е показана схема на генератор чиято честота зависи от кондензатора C_x . Тази схема е предназначена за капацитивен сензор с капацитет 100-200 pF който се променя с 5-10%. В дясната част на схемата е показан сензор при който при деформация се променя разстоянието между пластинките. За да се компенсира грешката от промяна на околните условия (диелектрична проницаемост и температура) в сензора е вграден еталонен кондензатор, а измерването се извършва по мостова схема. Тъй като изходният сигнал зависи от отношението (C_x/C_{et}) на двата кондензатора еднопосочните (синфазни) изменения не влияят. Когато такъв сензор се използва за



измерване на capacitети 1-2 pF с разрешаваща способност 0.01pF работната честота трябва да е висока - 30-50 MHz. Използваната схема (вляво долу) е на ринг-модулатор и се прилага при измерване на гладкост на твърди дискове. Вдясно е показана схема за измерване на кръвно налягане. Сензорът е еластичен цилиндър който променя размерите си пропорционално на



налягането, при което се променя capacitетът между челото на цилиндъра и неподвижната опора. Този capacitет е включен в схема на мултивибратор с логически елементи от тип CD4002. Всъщност логическите елементи се използват като инвертори, но тази схема дава най-добри резултати по отношение на стабилност и слаба зависимост от температурата. За по-стабилна работна точка при серийно производство се използват три инвертора (стандартната схема е с два). Честотата се настройва плавно с тример 3к, а грубо с превключване на резистора 2,7к.

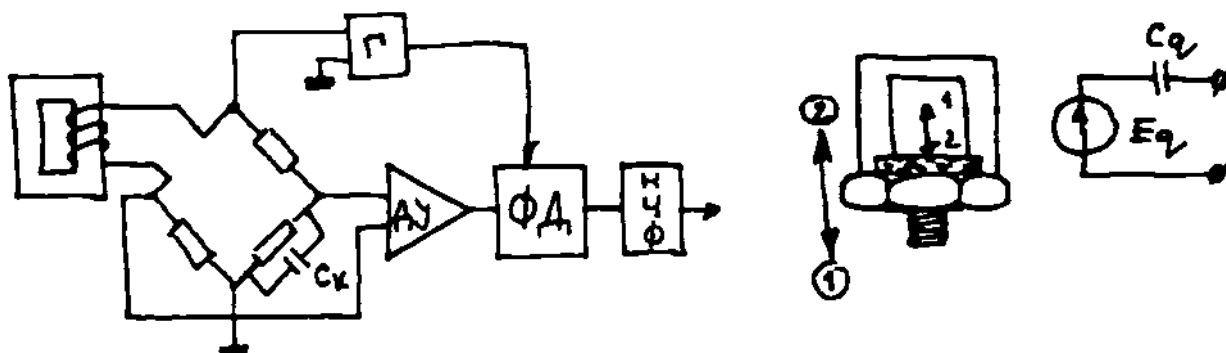
Магнитострикционни сензори:

Магнитострикционният ефект който се използва при тези сензори се състои в следното:

Когато магнитен материал се постави в магнитно поле той променя размерите си, а когато такъв материал се деформира – променя магнитните си свойства. При някои материали този ефект е по-силен – такива са никелът и неговите сплави, повечето ферити и др. Това е и причината да се използват честоти над обхвата на чуваемост (20 kHz) при изработването на ключови захранвания, компактни луминисцентни лампи и т.н.

Този ефект се използва както за технологични цели, за създаване на мощно ултразвуково излъчване – за заваряване, във флотационните процеси и т.н, така и при измерване на малки премествания – прилага се за измерване на тегло. Деформациите от приложената сила водят до промяна на индуктивността и до разбаланса на мост. Типична схема за измерване е показана на фигурата по-долу. В схемата няма нещо особено – стандартен променливотоков мост, който с кондензатор C_k се компенсира по реактивната съставка (активната се компенсира с резисторите).

Когато е необходимо да се определи и посоката на силата се използва фазов детектор. Ако това не е нужно се използва обикновен изправител. След това сигналът се филтрира и измерва.



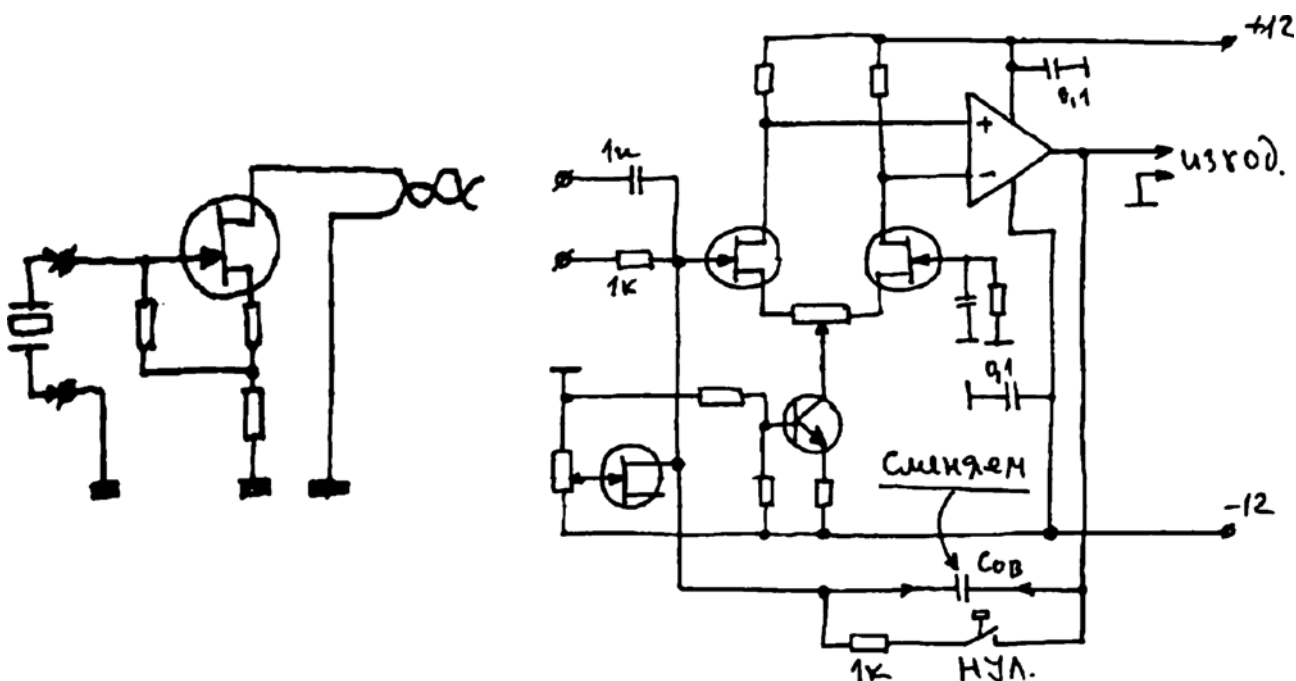
Пиезо-сензори:

Пиезо-електрическият ефект се проявява при някои вещества с кристална решетка – природен кварц, сегнетова сол, литиев сулфат, някои керамични материали и др. Когато такъв кристал се постави в електрическо поле променя размерите си синхронно с промените на полето (използва се за генериране на звукови и ултразвукови сигнали). Когато кристалът се деформира в подходяща посока се генерира електрически заряд.

За измерване на малки премествания сензорът има конструкцията показана горе вдясно. Върху пластинката от пиезоелемент, която е поставена на основа, се поставя инерционна маса. При движение на основата в посока 1 – 2 инерционната маса се противопоставя (иска да запази състоянието си на покой) и деформира пиезо-пластинката. Силата е $F = m \cdot a$. Така се генерира електрически заряд който е пропорционален на ускорението. Това е важно да се знае за по-нататъшната обработка на сигнала – с интегриране може да се получи скоростта и амплитудата на преместването. Типичните стойности на чувствителността на тези сензори са $0,5-50 \text{ mV} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ при честотен обхват $0,1 \text{ Hz}$ до 200 kHz .

Тази конструкция най-често се използва за измерване на вибрации при контролиране на състоянието на различни машини. Вибрациите на машините са показателни за възникващи повреди които може да се установят дни и седмици преди да настъпи авария, т.е да се планира ремонт в подходящо време.

Еквивалентната електрическа схема на пиезо-сензорите включва генератор на напрежение пропорционално на ускорението. Изходното съпротивление има капацитивен характер и е със стойност равна на капацитета на пиезо-пластинката – $0,1-10 \text{ nF}$. От това се определят и основните



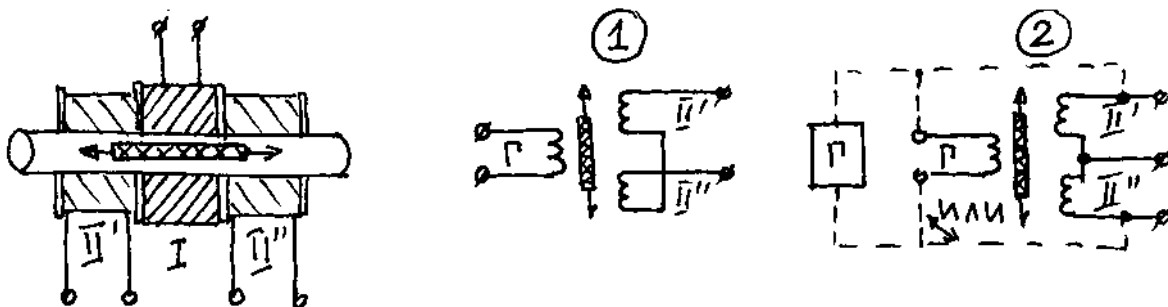
изисквания към електрониката предназначена за работа с пиезо-сензори. Изходният капацитет ограничава честотната лента откъм ниските честоти. Колкото е по-ниска изискваната работна честота толкова по-голямо трябва да е входното съпротивление на предусилвателя. За работна честота няколко херца изискваното съпротивление е 50-100 МΩ. В много от конструкциите в сензора се вгражда и предусилвател. Типичен предусилвател е показан на схемата по-горе. Той е реализиран с полеви транзистор с p-n преход. Схемата на свързване е с повишено входно съпротивление. Сигналът се предава по захранващия проводник.

Повечето от сензорите нямат вградени предусилватели. Ако се използват с усилватели на напрежение възникват сериозни проблеми поради малкия изходен капацитет на сензора. Между него и капацитетите на свързващия кабел, входния капацитет на съпалото, както и с паразитните капацитети се образува делител. Така коефициентът на предаване ще е различен при отделните случаи. Това налага използване на индивидуална настройка при различни уреди или при смяна на кабела който свързва сензора с усилвателя. Налага се използването на специални кабели за които е гарантирана стабилност на капацитета при огъване и преместване – при повечето приложения сензорът е поставен на подвижна част от машината. Специалните кабели са много по-скъпи от обикновените но не решават проблема с необходимостта от индивидуалната настройка при всяка измервателна постановка. В тези случаи се предпочитат електронните усилватели на заряд. При тях обратната връзка е капацитет – Сов. Като се напише формулата за коефициента на предаване с кондензатори в обратната връзка се получава: $U = E_q.Cq/Cov$, като поради големия коефициент на усилване на ОУ влиянието на другите капацитети може да се пренебрегне. Тъй като $E_q.Cq = q$ е заряда който се генерира от сензора този тип усилватели се наричат усилватели на заряд. Поради това и много фирми дават чувствителността на сензорите в заряд на единица ускорение. При тези схеми долната гранична честота се определя от елементите задаващи постояннотоковия режим – резисторът в обратната връзка. Когато се изисква ниска гранична честота резисторът трябва да е с много голяма стойност. Входното съпротивление на усилвателя също трябва да е много голямо – $10^{14} - 10^{16} \Omega$. То се реализира със специални полеви транзистори. На фигурата по-горе вдясно е показан такъв усилвател на заряд. Особеност при него е компенсирането на входния ток на полевия транзистор с аналогичен – двата прехода са свързани противоположно. При настройката токовете се изравняват с потенциометъра. За максимално входно съпротивление в обратната връзка няма резистор, а . постояннотоковият режим на ОУ се поддържа, като периодически, преди измерване, се включва бутон (реле) НУЛ. Коефициентът на предаване се сменя с подбор на кондензатора в обратната връзка Сов.

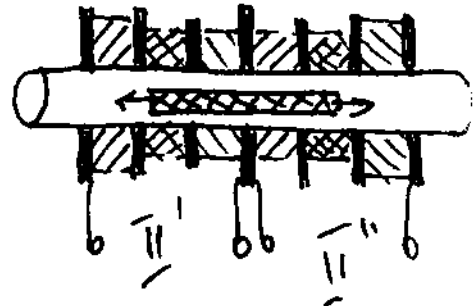
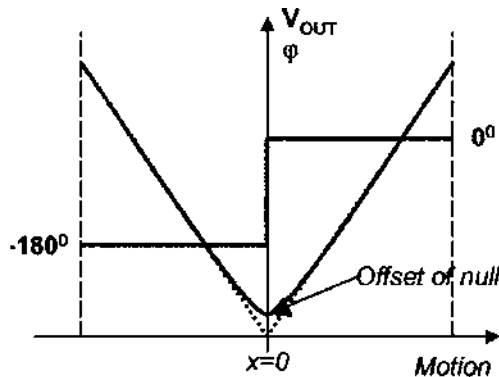
Индуктивни сензори:

Основата на този метод е промяната на индуктивността на бобина (намотка) при преместване на феромагнитната ѝ сърцевина. В зависимост от предназначението и точността има различни сензори които се различават един от друг най-вече по конструкцията на бобините. За измерване се използват предимно сензори с две бобини. Така се гарантира по-добра линейност и се компенсира влиянието на околните фактори, най-вече на температурата. Сензори с една бобина се използват по-често като крайни изключватели или при измерване с малка точност.

Две конструкции са намерили най-голямо приложение – с две и с три бобини. На фигурата

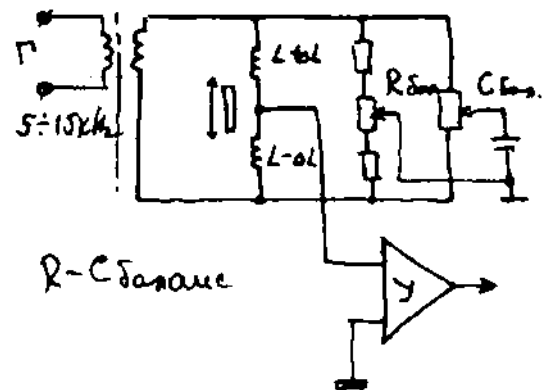
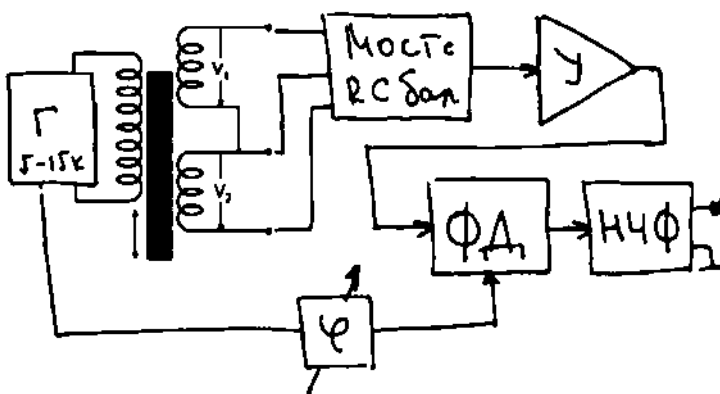


схематично е показана конструкцията. В средата е генераторната намотка, а от двете страни – вторичните намотки. Има два варианта на свързване на вторичните намотки. При единия (1) сигналите от двете намотки се изваждат, а при другия (2) двете намотки са свързани последователно. При втория вариант е задължително да се използва мостова схема. И двата варианта на свързване се използват и имат предимства и недостатъци. При втория има възможност конструкцията да се опрости като се премахне генераторната намотка и вторичните намотки да се захранват директно от генератора както е показано на фигурата. При този вариант се усложнява електронната част защото е задължително използването на мостова схема. При схемата (1) с изваждане има проблеми около нулата *Offset of null* както е показано по-долу. Ефектът се дължи на



капацитивното прехвърляне на сигнал от генератора. При втория вариант с отделното балансиране на моста по активна и реактивна съставка (R-C баланс) този проблем е решен. За по-добра линейност вторичните бубини се разделят на секции с различен брой навивки – така значително се увеличава линейния участък. Подробности за тези сензори (на английски са познати като LVDT) са дадени в допълнителните материали Add_M2.rar – lvdt_sens.rar.

Пример на блокова схема за работа с този тип сензор е дадена по долу. Изискванията към



отделните електронни блокове се свеждат до:

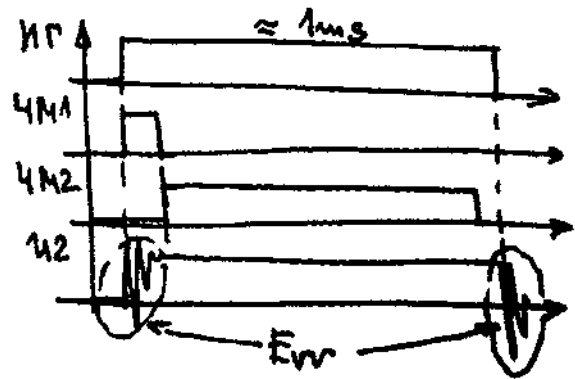
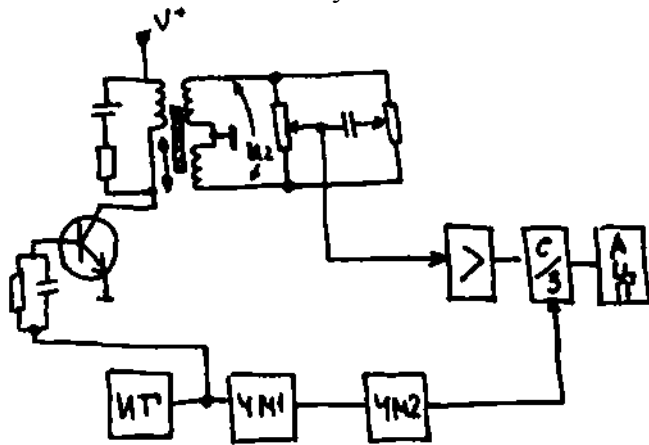
- генератор: постоянна честота и амплитуда, малки нелинейни изкривявания в широк обхват от температури.
- мостова схема: да има възможност за балансиране (нулиране) по активна и реактивна съставка. Примерно решение е показано на фигурата.
- предусилвател: стабилна амплитудно-честотна и фазова характеристика. Работната честота обикновено е в обхвата 5-15 kHz. Повечето операционни усилватели с вътрешна честотна корекция при тази честота имат недостатъчно усилване без обратна връзка. Например LM741, който за постоянен ток има усилване >100 000, при 10 kHz усилва само 100 пъти и то без ОВ. Това е така защото поради вътрешната корекция усилването започва да спада още при 10 Hz с 10dB/dec. Добър предусилвател се прави с ОУ с външни корекции подбрани за конкретния коефициент на усилване.

- фазов (синхронен) детектор: използването на фазов детектор е задължително когато трябва да се установи посоката на преместването. Ако това не е необходимо например при еднопосочно преместване, може да се използва обикновен изправител (детектор). И при двата детектора се изисква линейност в характеристиката при работната честота. Обикновено се налага и да се настройва фазата на опорния сигнал от генератора за да се компенсира закъснението в предусилвателя.

- нискочестотен филтър: изискванията към филтъра се отнасят до ширината на честотната му лента. Когато се измерват нискочестотни сигнали (тегло, механични размери и др.) лентата не е важна и се ползва RC група с голяма времеконстанта. Когато тези сензори се използват в системи за управление, при измерване на вибрации и др. се изисква максимално широка лента. Естествено честотната лента е ограничена от честотата на генератора. С подходящи активни филтри може да се достигне до горна гранична честота $\frac{1}{2}$ от генераторната.

След нискочестотния филтър сигналът може да се преобразува в цифров или да се използва като аналогов за обратна връзка.

Исходният сигнал на индуктивните сензори е пропорционален на преместването и на напрежението от генератора. От друга страна чувствителността на електронната част се определя от шумовете на предусилвателя и качествата на детектора. За увеличаване на разрешаващата способност на измервателния уред трябва да се увеличи сигнала от сензора. Увеличаването на напрежението увеличава и разсейваната мощност върху сензора и той се загрява. Това води до влошаване на характеристиките му. Производителите на сензори ограничават ефективната стойност на променливото напрежение при което е гарантирано качеството. За да се увеличи чувствителността на измерването без да се прегрява сензора се използва импулсно измерване – както е показано по-долу.



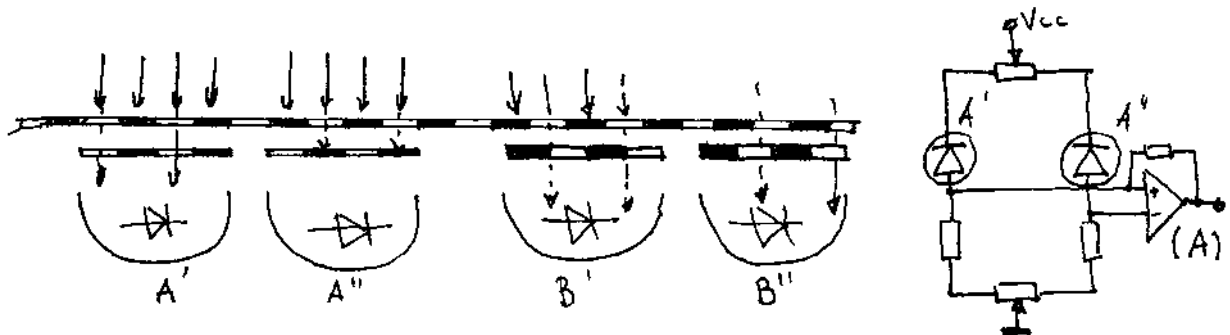
Импулсен генератор подава напрежение на моста като изходният сигнал се запомня в схема следене запомняне. Схемата C/3 се “отваря” малко след началото на импулса и затваря малко преди края. Това е необходимо за да се избегнат преходните процеси и се реализира с двата чакащи мултивибратора ЧМ1, ЧМ2. Дължината на импулсите зависи от индуктивността на сензора и се подбира така, че грешката от спадането на амплитудата да е по-малка от зададената. И при тази схема за измерване се налага RC баланс на моста. Друго важно изискване е да се използва импулсен усилвател с параметри гарантиращи зададената грешка на преобразуване.

Фоторастерни преобразуватели:

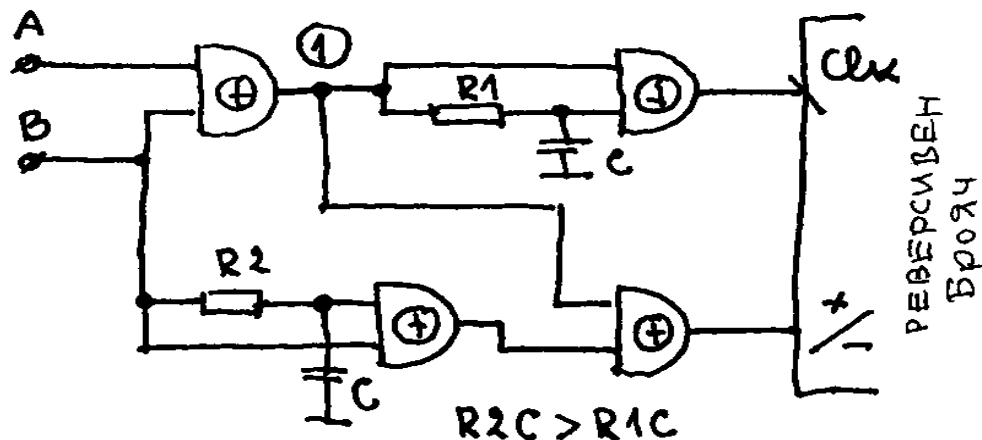
Тези сензори работят на принципа на пропускане на светлината преминаващ през специално изработени маски. Маските представляват прозрачни и непрозрачни ивици (растер). Светлината която преминава през маските попада на фотоприемник и променя фототока през него. Ако ивиците са изработени по подходящ начин (цифров код) може да се установи мястото на маската, т.е да се определят координатите. В този случай точността и разрешаващата способност зависят от

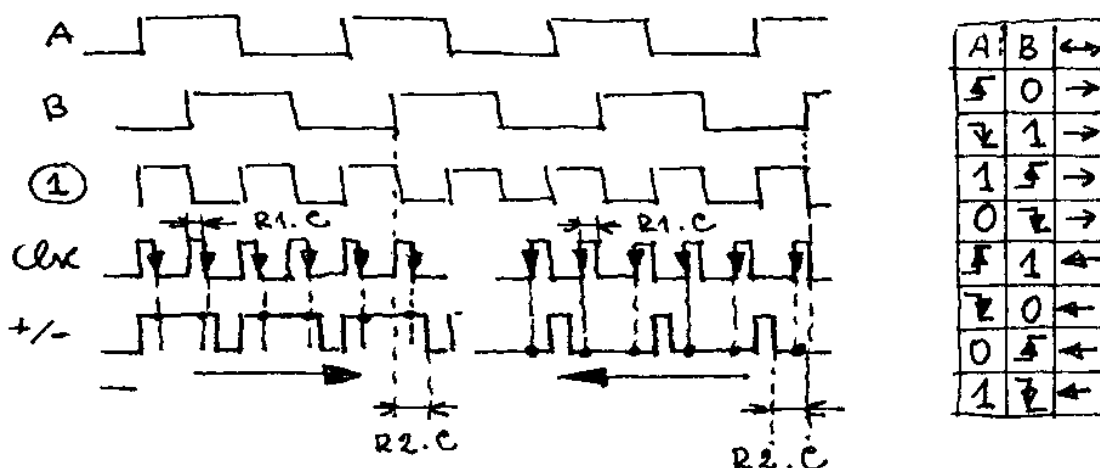
размерите на фотоприемника. Тези размери на са достатъчно малки за да се извършва прецизно измерване. Предимство на такъв преобразувател е, че се получават абсолютните координати на маската (съответно на измерваната величина). Цифровият код обикновено се подбира да е код на Грей за да няма грешни отчитания при междинните положения на маската.

Съвременните методи позволяват фоторастерът да се изработи с много по-малка стъпка и така да се получи по-голяма разрешаваща способност. В този случай фотоприемникът не може директно да “разпознава” растера поради по-големия си размер. Използва се неподвижна маска пред фотоприемника както е показано на фигурата. Когато растерът на подвижната маска съвпадне с този на неподвижната преминалата светлина е с максимална стойност, когато прозрачните участъци са срещу непрозрачните се получава минимум на светлината. По този начин



се получава информация за движението на маската като разрешаващата способност се определя от стъпката на растера на маските, а не от размерите на фотоприемника. За по-голяма прецизност се използват две неподвижни маски в “противофаза”. Когато едната (A') пропуска максимално другата (A'') пропуска минимално. Сигналите от тези фотоприемници се използват за формиране на една поредица A в която всеки импулс съответства на преминаване на една ивица от растера. Двата фотоприемника позволяват да се компенсира стареенето на светлинния източник и промяната на режимите на фотодиодите защото сигналът A' в компаратора не се сравнява с постоянно ниво, а с инверсията на A'' получен при същите условия. За да се определи и посоката на движението се използва втора двойка фотоприемници B', B''. Сигналът получен от тях е в квадратура (90°) спрямо този от двойката A. В зависимост от нивото на сигнала на поредицата B, при преход (0→1 или 1→0) на поредица A, се определя посоката на движение. Доколкото двете поредици се получават по един и същ начин и двете могат да се използват за отброяване на ивици и за определяне на посоката. Най-голяма разрешаваща способност се получава когато се отчита преместването на всеки един фронт и на двете поредици. Така ако растерът е със стъпка 20 μm се получават 5 μm разрешаваща способност. До 1 μm се стига от същия растер като аналогово се измерва изходният сигнал от фотоприемниците – достатъчни са пет нива. Освен A и B поредиците се използва и C която се използва за начало. Поредиците A и B показват промяна на положението





на маската но не дават абсолютните координати. Затова при включване на такъв измерител трябва да се определи нулевото положение – затова се използва сигналът С. Поради тази особеност на този тип фоторастерни преобразуватели те често се наричат **инкрементални** защото изходният им сигнал е пропорционален на нарастването, а не дава абсолютни координати. На схемата по-горе е показано как от двете поредици А и В се управлява реверсивен брояч. Неговото състояние показва местоположението на подвижната маска, съответно измервания размер. В схемата е използвана една интегрална схема “сума по модул две”. От двете поредици А и В се прави една - (1). Така и двете поредици ще се използват за отчитане на преместването и ще се получи по-голяма разрешаваща способност. С помощта на групата R1C при всеки преход се получава импулс на входа Clk на брояча. От таблицата се вижда, че когато импулсите се получават от поредицата В, логиката за определяне на посоката е инверсна, т.е посоката на броене трябва да се смени. Това става с R2C, като тази времеконстанта трябва да е по-голяма от R1C, т.е по време на задния (активен) фронт към Clk, сигналът на входа за посоката (+/-) да е инвертиран.

По-подробно за фоторастерните сензори в Add_M2.rar – Incr.zip(IncrSen.htm).

Въпроси:

От лекциите!