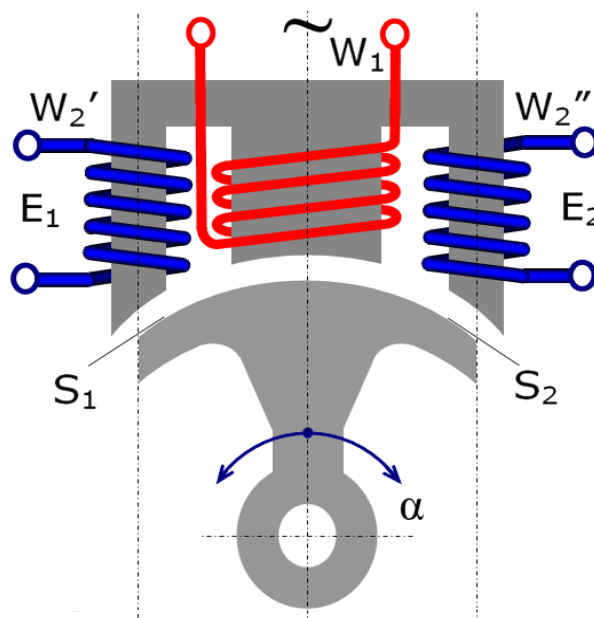
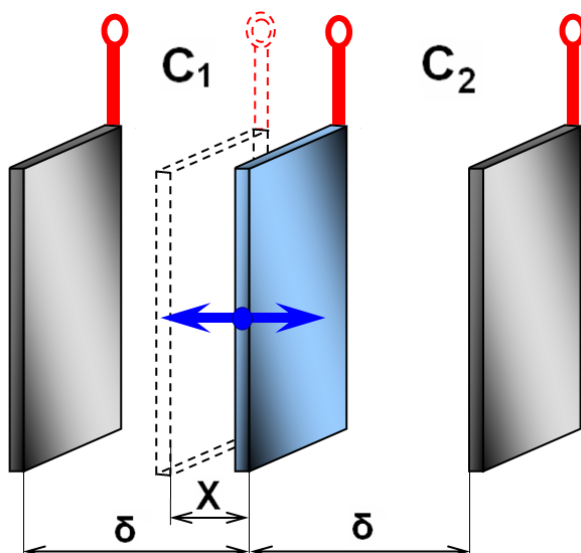
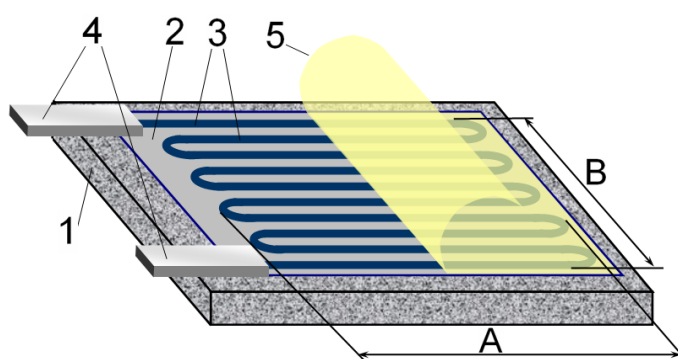
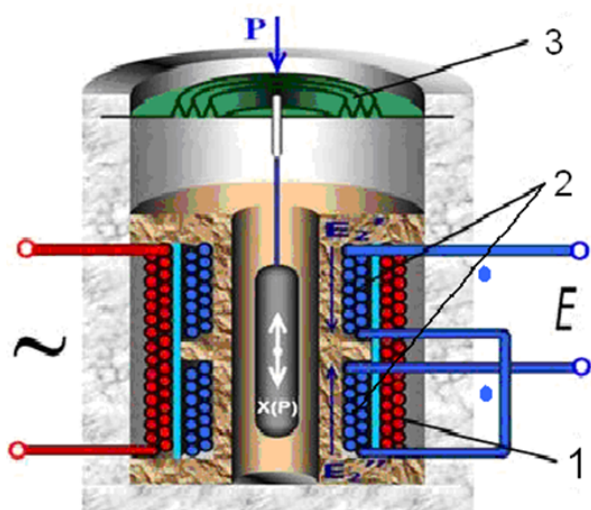


ИЗМЕРВАНЕ НА НЕЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНИ



ПРОФ. ЗВЕЗДИЦА НЕНОВА
ПРОФ. ТОШКО НЕНОВ
ДОЦ. СТЕФАН ИВАНОВ

ИЗМЕРВАНЕ НА НЕЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНИ



УНИВЕРСИТЕТСКО ИЗДАТЕЛСТВО
“ВАСИЛ АПРИЛОВ”
ГАБРОВО, 2024

В учебника се разглеждат основните първични преобразуватели на неелектрически в електрически величини – сензори. Приведена е класификация на сензорите, описват се статичните и динамичните им характеристики и параметри. Разгледан е принципът на действие, видовете и конструкциите на сензорите за преместване, сила, механични напрежения, ускорение, налягане, наклон, поток, за близост и регистриране на обекти, ниво, температура, влажност, газове и др., както и сензорните интерфейси.

Описаните сензори се използват при изграждането на средства и системи за измерване и контрол на неелектрически величини, при мониторинг и управление на обекти и процеси практически във всички сфери на човешката дейност - в индустрията, селското стопанство, медицината, опазването на околната среда, бита и др. Те са важен фактор в автоматизацията и робототехниката.

Учебникът е предназначен за студенти от специалности „Автоматика, роботика и компютърни управляващи системи“, „Автоматика, информационна и управляваща техника“, „Техническа безопасност“ в Технически университет – Габрово, за други сродни специалности от техническите и технологични университети, както и за инженерно-технически работници, занимаващи се с измерване и контрол на неелектрически величини, при автоматизация и управление на технологични процеси и обекти в различни области.

ИЗМЕРВАНЕ НА НЕЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕЛИЧИНИ

© Звездица Петрова Ненова, Тошко Ганчев Ненов, Стефан Иванов Иванов,
2024

©Университетско издателство „Васил Априлов“, гр. Габрово, 2024

Рецензент: доц. д-р инж. *Станимир Йорданов Йорданов*

Формат: 60x84x14

Печатни коли:12.56

Първо издание

ISBN: 978-954-683-710-3

СЪДЪРЖАНИЕ

ВЪВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. КЛАСИФИКАЦИЯ НА СЕНЗОРИТЕ	7
1.1. СЕНЗОРИ.....	7
1.2. КЛАСИФИКАЦИОННИ ПРИНЦИПИ.....	9
ГЛАВА 2. СЕНЗОРНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ	13
2.1. СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРИ	13
2.2. ДИНАМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРИ.....	19
ГЛАВА 3. СЕНЗОРИ ЗА ПОЛОЖЕНИЕ И ПРЕМЕСТВАНЕ	23
3.1. КОНТАКТНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	23
3.2. ПОТЕНЦИОМЕТРИЧНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	26
3.3. ИНДУКТИВНИ И ВЗАИМНОИНДУКТИВНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	32
3.4. КАПАЦИТИВНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	41
3.5. ОПТИЧЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ НА ПОЛОЖЕНИЕ	47
3.6. АБСОЛЮТНИ И ИНКРЕМЕНТАЛНИ (ОТНОСИТЕЛНИ) ЕНКОДЕРИ	47
3.7. ИНДУКЦИОННИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	50
ГЛАВА 4. СЕНЗОРИ ЗА СИЛА, МЕХАНИЧНИ НАПРЕЖЕНИЯ И ТАКТИЛНИ СЕНЗОРИ	55
4.1. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	55
4.2. ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	69
4.3. МАГНИТОЕЛАСТИЧНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	70
4.4. ТАКТИЛНИ СЕНЗОРИ	74
ГЛАВА 5. ИНЕРЦИАЛНИ СЕНЗОРИ.....	81
5.1. АКСЕЛЕРОМЕТРИ.....	81
5.2. ЖИРОСКОПИ.....	88
5.3. ИНКЛИНОМЕТРИ.....	94
ГЛАВА 6. СЕНЗОРИ ЗА НАЛЯГАНЕ	97
6.1. ВИДОВЕ СЕНЗОРИ ЗА НАЛЯГАНЕ СПОРЕД МЕТОДА НА ИЗМЕРВАНЕ.....	97
6.2. ВИДОВЕ СЕНЗОРИ СПОРЕД ПРИНЦИПА ИМ НА ДЕЙСТВИЕ.....	99
ГЛАВА 7. СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК	103
7.1. РОТАЦИОННИ СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК.....	103
7.2. СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК НА ОСНОВАТА НА ИЗМЕРВАНЕ НА НАЛЯГАНЕ	105
7.3. УЛТРАЗВУКОВИ СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК.....	107
7.4. МАГНИТО-ИНДУКТИВНИ СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК	108
7.5. КАЛОРИМЕТРИЧНИ СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК.....	109
7.6. ВИХРОВИ СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК	110

7.7. СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК ЗА ОТВОРЕНИ КАНАЛИ.....	110
7.8. КОРИОЛИСОВ СЕНЗОР ЗА ПОТОК	111
ГЛАВА 8. СЕНЗОРИ ЗА БЛИЗОСТ, РЕГИСТРИРАНЕ НА ОБЕКТИ И НИВО	115
8.1. КОНТАКТНИ СЕНЗОРИ ЗА РЕГИСТРИРАНЕ НА ОБЕКТИ.....	115
8.2. СЕНЗОРИ ЗА БЛИЗОСТ.....	115
8.3. ОПТИЧНИ СЕНЗОРИ.....	122
8.4. УЛТРАЗВУКОВИ СЕНЗОРИ.....	126
8.5. РАДАРНИ СЕНЗОРИ.....	131
8.6. СЕНЗОРИ ЗА НИВО.....	133
ГЛАВА 9. ТЕМПЕРАТУРНИ СЕНЗОРИ.....	140
9.1. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИ СЕНЗОРИ.....	140
9.2. ТЕРМОРЕЗИСТОРНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	153
9.3. ТЕРМОДИОДИ, ТЕРМОТРАНЗИСТОРИ И ИНТЕГРАЛНИ ТЕМПЕРАТУРНИ СЕНЗОРИ.....	167
9.4. БЕЗКОНТАКТНИ ТЕМПЕРАТУРНИ СЕНЗОРИ.....	173
ГЛАВА 10. СЕНЗОРИ ЗА ВЛАЖНОСТ И ГАЗОВЕ.....	177
10.1. СЕНЗОРИ ЗА ВЛАЖНОСТ	177
10.2. ГАЗОВИ СЕНЗОРИ.....	185
ГЛАВА 11. СЕНЗОРНИ ИНТЕРФЕЙСИ	191
11.1. НАПРЕЖЕНОВ ИЗХОД	191
11.2. ТОКОВ КРЪГ.....	191
11.3. ЧЕСТОТЕН СИГНАЛ И ШИРОЧИННО-ИМПУЛСНА МОДУЛАЦИЯ.....	192
11.4. ЦИФРОВИ ИНТЕРФЕЙСИ	194
ЛИТЕРАТУРА.....	199

ВЪВЕДЕНИЕ

Неелектрическите величини обхващат много широка гама от величини като преместване, сила, налягане, температура, концентрация на газове и др., характеризиращи различни обекти и процеси в индустрията, селското стопанство, околната и работната среда, медицината, бита и др. Измерването им се извършва основно посредством електрически методи и средства поради по-високите им метрологични свойства по отношение на точност, чувствителност, бързодействие и др., както и поради възможността за автоматизация на процесите на измерване, контрол и управление, включително извършване на дистанционно измерване. За целта в измервателните средства неелектрическите величини се преобразуват в електрически с помощта на съответни първични измервателни преобразуватели, известни още като сензори.

Те позволяват получаване на информация за състоянието на управляваните обекти, като преобразуват контролираната величина в сигнал, удобен за измерване, съхранение и обработка.

Настоящият учебник е предназначен да предостави базови знания в областта на използваните при измерване и контрол на неелектрически величини сензори.

В Глава 1 е направена класификация на сензорите и изискванията към тях. Представени са основните принципи на функционирането им.

В Глава 2 са описани статичните и динамични характеристики и параметри на сензорите.

Сензорите за положение и преместване са разгледани в Глава 3. Описани са контактните, потенциометрични, индуктивни, взаимноиндуктивни, капацитивни, оптични и индукционни преобразуватели. Представена е конструкцията на сензорите.

В Глава 4 са описани основните типове сензори за сила и механични напрежения и тактилни сензори, принципа им на действие, техните видове, особености и конструкции.

В Глава 5 са представени инерциалните сензори, като са разгледани основните типове акселерометри, жirosкопи и инклинометри.

В Глава 6 се разглеждат сензорите за налягане. Представени са различни типове сензори за налягане – взаимноиндуктивни, капацитивни, пиезоелектрически, тензорезистивни и оптични.

В Глава 7 са разгледани сензорите за поток. Описани са ротационните, на основата на измерване на налягане, ултразвуковите, магнитоиндуктивните, калориметричните, вихровите и кориолисовите сензори за поток.

Сензорите за близост, регистриране на обекти и ниво са представени в Глава 8. Разгледани са принципа им на действие, техните разновидности и режими на работа, особености при приложение.

Обект на разглеждане в Глава 9 са температурните сензори. Описани са термоелектрическите и терморезисторните преобразуватели. Разгледани са термисторите, термодиодите, термотранзисторите и интегралните температурни сензори, както и безконтактните сензори за измерване на температура.

В Глава 10 са представени сензорите за влажност и газове. Разгледани са различните типове сензори за влажност в съответствие с принципа им на действие. Представени са основните типове газови сензори, като основно внимание е отделено на металооксидните.

В Глава 11 е дадено описание на интерфейсите, които се използват в сензорите. Представени са основните цифрови интерфейси за жична и безжична комуникация.

Разгледаните сензори се използват при изграждането на средства и системи за измерване и контрол на неелектрически величини, при автоматизация, мониторинг и управление на обекти и процеси практически във всички сфери на човешката дейност.

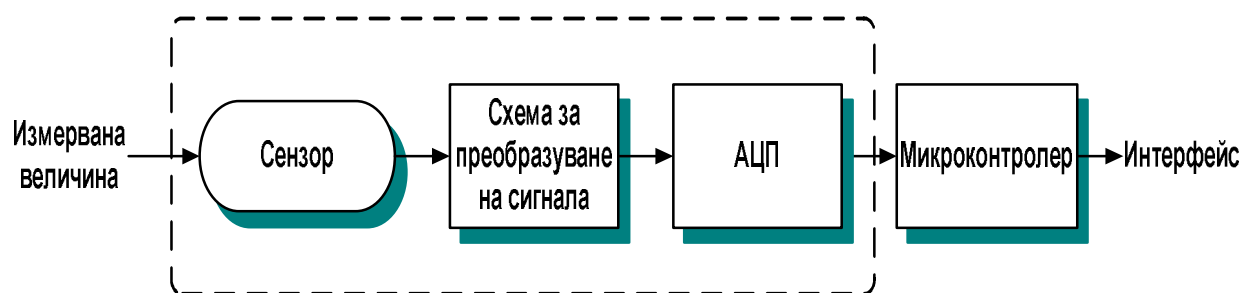
ГЛАВА 1. КЛАСИФИКАЦИЯ НА СЕНЗОРИТЕ

1.1. Сензори

Прогресът в техниката на обработка на информацията и бързото развитие на компютърните и комуникационните технологии определят и интензивността в развитието на сензорите. Компютърните технологии са в основата на съвременните измервателни и управляващи системи. Тъй като възможностите на тези системи се увеличават, ролята на сензорите, явяващи се първично звено във възприемането на информацията от обекта на измерване, съществено нараства. Сензорите се превръщат във важен фактор на автоматизацията и робототехниката и придобиват все по-голямо значение като конструктивни елементи на системите.

Най-общо сензорите представляват устройства, които преобразуват физични или химични величини в електрически сигнали. Дефиницията, която се дава от International Electrotechnical Committee (IEC) за сензор, е: “Сензорът е първична част от измервателната верига, която преобразува входната величина в подходящ за измерване сигнал”.

Сензорът е включен в сензорната система и той е първичният елемент, служещ за въвеждане на измерваната информация. Обобщената блокова схема на сензорната система е представена на фиг.1.1.

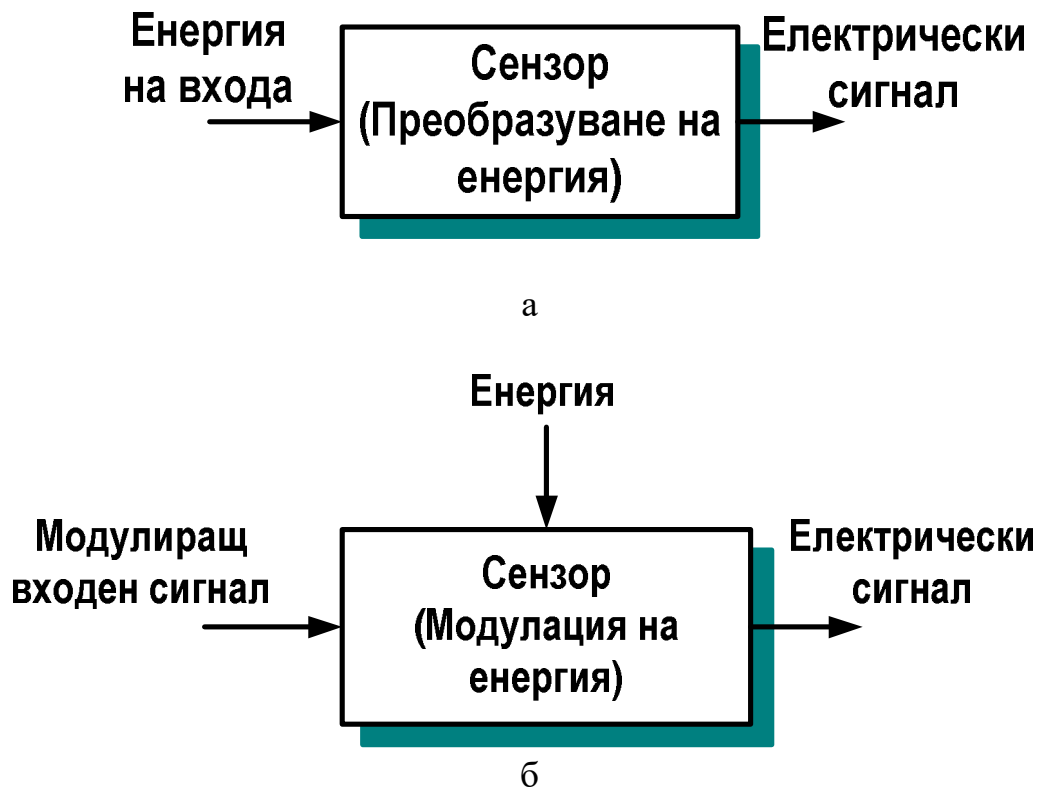


Фиг.1.1. Обобщена блокова схема на сензорна система

Обикновено сигналът, постъпващ от сензора, е малък по амплитуда, като е смесен със смущаващи сигнали. Освен това може да възникне необходимост от линеаризирането му. Формирането на сигнала с оптимални характеристики за следваща обработка се осъществява с помощта на схема за нормализиране на сигналите, която може да включва усилвател, филтър и други аналогови схеми. В някои случаи част от тези схеми са в непосредствена близост до сензорния елемент. Формираният аналогов сигнал след това се преобразува в цифров с помощта на аналогово-цифров преобразувател (АЦП) и се предава към микроконтролера.

Характеристиките на сензорната система до голяма степен се определят от сензора. Той преобразува една форма на енергия в друга.

Съществуват два основни типа сензори: активни и пасивни. Активният сензор непосредствено преобразува една форма на енергия в друга без да се нуждае от допълнителен външен източник на енергия или възбуждане (фиг.1.2а)



Фиг.1.2. Активен (а) и пасивен (б) сензор

Пасивният сензор не може непосредствено да преобразува енергия, но той управлява енергията или възбуждането, които постъпват от друг източник (фиг.1.2б).

За реализация на функциите на сензора се използват различни физични ефекти и принципи на действие. Сензорът може да контактува с измерваната величина или да е безконтактен. Многообразието от използваните принципи на действие и ефекти постоянно се разширява, а действащите при това процеси се усъвършенстват.

Към сензорите се поставят определени изисквания. Те биват основни, отнасящи се до всички типове сензори и специални, отнасящи се до конкретен тип сензори. Основните изисквания, изпълнявани по различен начин в зависимост от принципа на действие и конструкцията на сензора, са:

- висока чувствителност;
- линейност;
- висока точност;
- отсъствие на хистерезис;

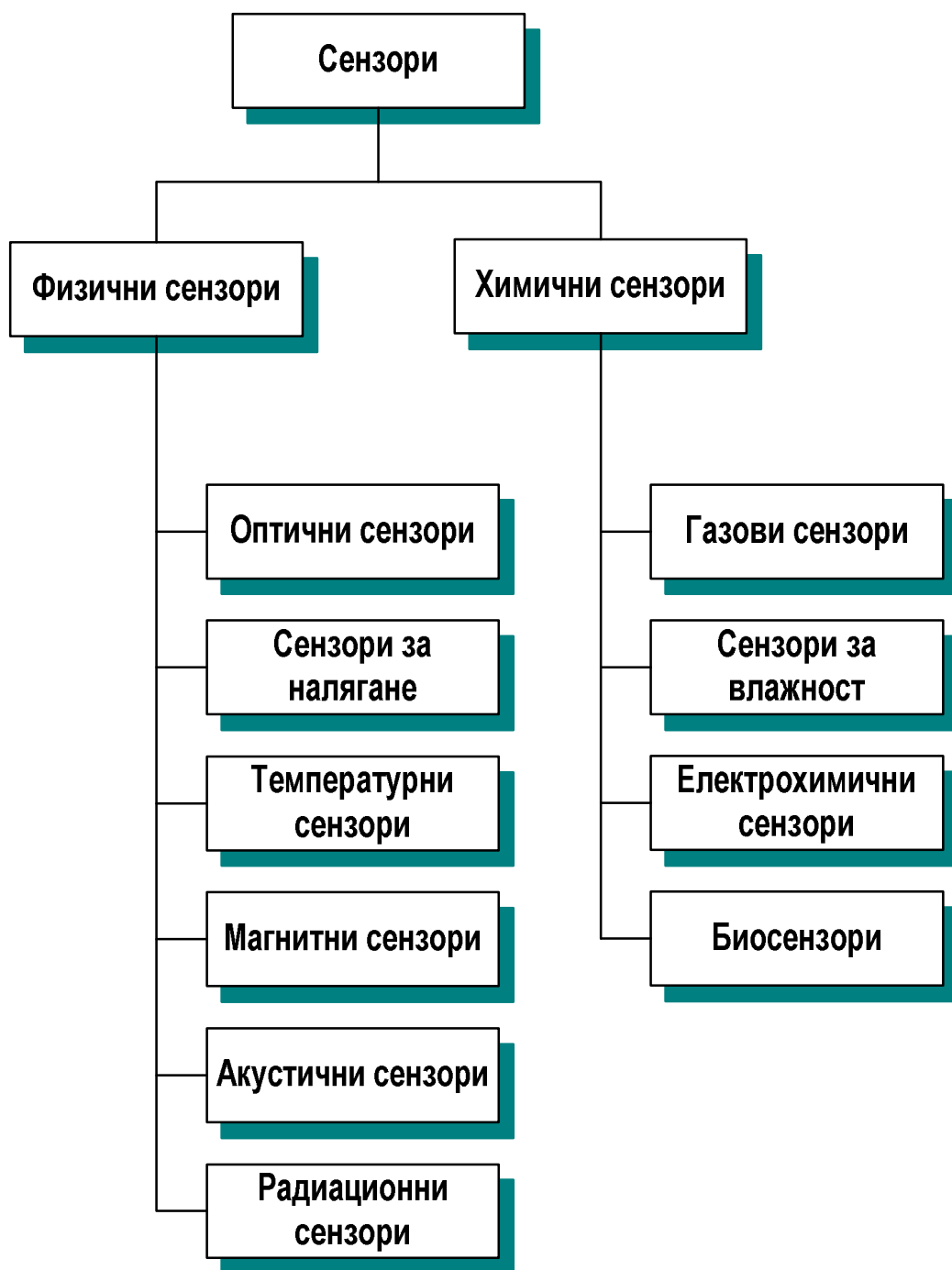
- възпроизводимост;
- висока скорост на реакция;
- селективност;
- взаимозаменяемост;
- широк диапазон на измерване;
- широк диапазон на работните температури;
- стабилност към смущаващи въздействия (шумоустойчивост);
- лесна възможност за корекция (калибровка);
- висока надеждност;
- дълъг срок на работа;
- устойчивост към стареене;
- устойчивост към въздействие на околната среда (топлина, вибрации, влага, прах и др.);
- безопасност при работа;
- невисока цена;
- малки габаритни размери, малко тегло и здравина.

1.2. Класификационни принципи

Сензорите могат да се класифицират от гледна точка на принципите на преобразуване (физичните или химични ефекти, на основата на които те функционират), предназначението, вида на изходните сигнали, материалите и технологията на изготвянето им. Класификацията на сензорите в зависимост от принципа на функциониране е показана на фиг.1.3. Те се разделят на физични и химични.

Физичните сензори включват сензорите, в които вследствие на проявата на физични ефекти като пиезоелектрически, магнитострикционен, йонизационен, термоелектрически, фотоелектрически, магнитоелектрически и др. измененията на измерваната величина се преобразуват в електрически сигнал.

Химичните сензори включват сензорите, в които вследствие на химическа адсорбция, електрохимични реакции и др. изменения на измерваната величина се преобразуват в електрически сигнал.



Фиг.1.3. Класификация на сензорите в зависимост от принципа на функционирането им

Използваните принципи на функциониране на сензорите и възможните приложения на някои от тях са показани в табл.1.1.

Таблица 1.1. Принципи на функциониране на сензорите

Тип на сензора	Принцип на функциониране	Измервана неелектрическа величина
Тензорезистор Термистор (NTC, PTC) Полупроводников сензор	Изменение на съпротивлението	Сила, маса, налягане, ускорение, разширение, ниво, температура, влажност, газ
Капацитивен сензор	Изменение на капацитета	Сила, маса, налягане, ускорение, ниво, влажност
Индуктивен сензор	Изменение на индуктивността	Сила, маса, налягане, ускорение, брой обороти, въртящ момент, магнитно поле
Сензор на Хол	Ефект на Хол	Ъгъл, брой обороти, сила, магнитно поле
Пиезоелектрически сензор Ултразвуков сензор	Пиезоелектрически ефект	Налягане, сила, ускорение, разстояние
Пироелектрически сензор	Пироелектрически ефект	Дим, огън, топлинно разпределение
Оптоелектронни сензори	Оптоелектронни ефекти	Излъчване, ъгъл, брой обороти, преместване, въртящ момент

Според предназначението си сензорите се разделят на:

- сензори за налягане и сила;
- сензори за ниво;
- сензори за скорост;
- сензори за ускорение;
- сензори за вибрации;
- сензори за магнитно поле;
- сензори за вакуум;
- сензори за преместване;
- сензори за разход;
- сензори за температура;
- сензори за радиоактивни излъчвания;
- сензори за влажност;
- сензори за газове;
- биосензори и др.

В зависимост от типа на изходния сигнал сензорите се разделят на:

- аналогови сензори – преобразуват измерваните неелектрически величини в аналогов електрически сигнал;
- цифрови сензори – преобразуват измерваните неелектрически величини в цифров изходен сигнал (пряко или косвено преобразуване);
- псевдоцифрови сензори – преобразуват измерваните величини в честота или интервал от време (пряко или косвено преобразуване);
- ключови сензори – реагират при достигане на зададена прагова стойност (гранична стойност) на измерваната величина, като установяват изходния сигнал в ниско или високо ниво.

Всички материали при въздействие на външни фактори притежават съответна характерна ответна реакция. Тези от тях, които са най-много чувствителни към външни въздействия, т.е. притежават функционални свойства, се използват **в чувствителни елементи на сензори**.

От гледана точка на използваните материали, сензорите се разделят на следните групи:

- в зависимост от типа на използвания материал
 - метални;
 - керамични;
 - полимерни;
 - композиционни.
- от физическите свойства на материала
 - проводникови;
 - полупроводникови;
 - диелектрични;
 - магнитни.
- от кристалната структура на материала;
 - кристални;
 - поликристални;
 - аморфни.

ГЛАВА 2. СЕНЗОРНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Характеристиките и параметрите на сензорите могат да бъдат класифицирани в две групи:

- статични;
- динамични.

2.1. Статични характеристики и параметри

Статични характеристики и параметри са тези, които могат да бъдат определени, след като всички преходни процеси са завършили и са стабилизирани до техните крайни или стационарни стойности.

2.1.1. Функция на преобразуване (*Transfer function*)

Основната характеристика на сензора е *функцията на преобразуване*, която изразява зависимостта между изходната величина и входната (измерваната) величина в статичен режим

$$y = f(x) . \quad (2.1)$$

Тя може да бъде зададена във вид на формула, графика или таблица.

При линейна функция на преобразуване, когато тя минава през началото на координатната система, функцията на преобразуване се изразява като

$$y = kx . \quad (2.2)$$

Изходната величина зависи не само от измерваната величина, но и от някои други величини (смустващи фактори), като например температура на околната среда, налягане и др. Функцията на преобразуване може да бъде както линейна, така и нелинейна (логаритмична, експоненциална и др.). В много случаи сензорите с нелинейни функции на преобразуване могат да се разглеждат като линейни в ограничен диапазон на изменение на входната величина.

В общия случай функцията на преобразуване на еднотипни сензори, вследствие наличието на индивидуални особености, се отличават една от друга. Като обобщена характеристика на сензорите от даден тип се приема осреднена по резултатите от многократни измервания или за голяма група еднотипни сензори функция на преобразуване. Определянето на тази функция на преобразуване може да се извърши в определени точки на диапазона на сензора както при нормални условия, така и при въздействие на външни смущаващи фактори. На сензора се дава или определена по такъв начин осреднена функция на преобразуване, или някаква математическа функция, която е най-добро приближение към нея. Тази функция на преобразуване се нарича *градуировъчна характеристика*. Тя може да бъде записана аналитично, а също представена във вид на таблица или графика.

2.1.2. Чувствителност (Sensitivity)

Абсолютна и относителна чувствителност

Чувствителността S характеризира способността на сензора да реагира на измененията на входната величина. Тя може да се разглежда като отношение на изменението на изходната величина към изменението на входната величина, предизвикващо това изменение на изходната величина.

При линейна функция на преобразуване (фиг.2.1а) *абсолютната чувствителност* S е постоянна величина и се определя като

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (2.3)$$

където Δy и Δx представляват измененията съответно на изходната и входната величини.

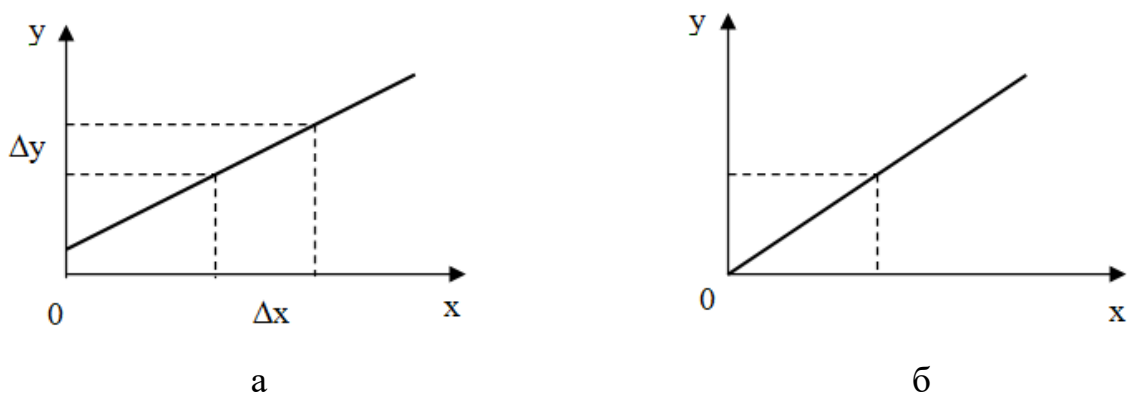
Ако *функцията* на преобразуване е линейна и графиката минава през началото на координатната система (фиг.2.1б), то

$$S = \frac{y}{x}. \quad (2.4)$$

Ако *функцията* на преобразуване е нелинейна, то чувствителността се определя като

$$S = \frac{dy}{dx}. \quad (2.5)$$

Тя е променлива величина и зависи от стойността на входната *величина* x (фиг.2.2). В случая $S_1 > S_2 > S_3 > S_4 > \dots$.



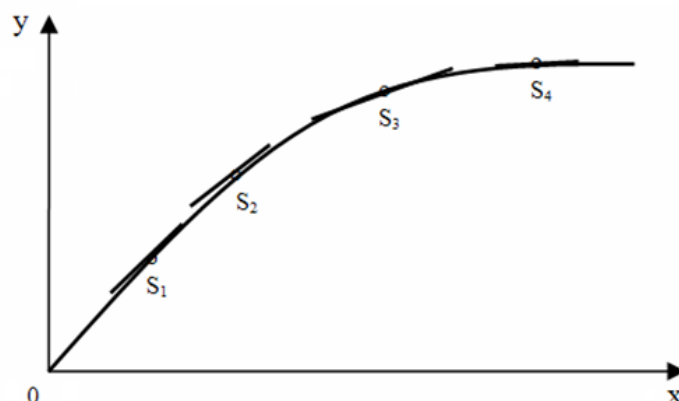
Фиг.2.1. Линейни функции на преобразуване

Често се дефинира и параметърът *относителна чувствителност*

$$S_{o1} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}}{\frac{y}{x}} \quad \text{или} \quad S_{o2} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}}{\frac{\Delta x}{y}} = \frac{\Delta y}{y} \cdot \frac{x}{\Delta x}, \quad (2.6)$$

т.е. изменението на изходната величина към относителното изменение на входната величина или относителното изменение на изходната величина към относителното изменение на входната величина, съответно.

Идеалният сензор има голяма и за предпочитане - постоянна чувствителност в работния си диапазон.



Фиг.2.2. Чувствителност при нелинейна функция на преобразуване

2.1.3. Измервателен диапазон (Measurement Range)

Разликата между максималната и минимална стойност на измерваната физическа величина се нарича измервателен диапазон или обхват на измерване. Всички сензори са проектирани да работят в определен диапазон. Сигналите извън този обхват може да доведат до неприемливо големи неточности и дори до необратими повреди на сензора.

Обикновено обхватът на измерване на даден сензор е посочен в неговото техническо описание. Например, ако обхватът на измерване на температурен сензор е между 100°C и 800°C , излагането му на температури извън този диапазон може да причини повреда или да генерира неточни измервания.

2.1.4. Праг на чувствителност (Minimum Detectable Signal)

В сензорната система *прагът на чувствителност* е най-малката стойност на измерваната величина, която предизвиква изменение на изходната величина, като се вземат предвид всички смущаващи фактори. Ако смущенията са големи по отношение на входа на сензора, ще бъде трудно да се получи отчетлив сигнал на изхода и не може да се получи малък праг на чувствителност. Прагът на чувствителност се оценява в абсолютни или относителни единици на измерваната величина (например, за температурен сензор: $0,5^{\circ}\text{C}$ или $0,2\%$ от измервателния диапазон 250°C).

2.1.5. Точност и грешки (Accuracy and errors)

Точността или грешката на сензорите е тяхната най-важна метрологична характеристика. Грешките на сензорите могат да се разделят в зависимост от различни класификационни признаци.

- *По начин на изразяване*

- *Абсолютна грешка Δx (Absolute error)*

Определя се като разлика между стойността x на измерваната величина и действителна стойност x_0 на тази величина

$$\Delta x = x - x_0. \quad (2.7)$$

Абсолютната грешка има размерност, еднаква с тази на измерваната величина. Тя може да бъде приведена към входа или към изхода на сензора.

- *Относителна грешка ε (Relative error)*

Относителната грешка представлява отношението на абсолютната грешка към действителната стойност на измерваната от сензора величина и обикновено се изразява в проценти

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (2.8)$$

- *Приведена грешка ε_n*

За оценка на точността на сензора може да се използва приведената грешка, която представлява отношение на абсолютната грешка към нормираща стойност. Най-често за нормираща стойност се приема измервателният диапазон на сензора ($x_{\max} - x_{\min}$)

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

- *В зависимост от стойността на входната величина*

- *Адитивна грешка (грешка на нулата)*

Адитивната грешка не зависи от стойността на измерваната величина, т.е. при всяка възможна стойност на измерваната величина тя е постоянна. Нарича се още грешка на нулата, защото когато измерваната величина е нула, на изхода на сензора има ненулева изходна величина.

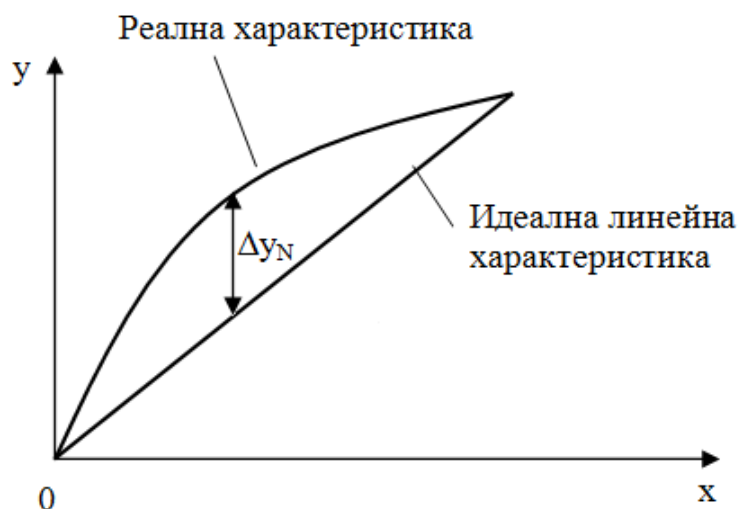
- *Мултипликативна грешка (грешка от чувствителност)*

Мултипликативната грешка зависи от стойността на измерваната величина, като нараства линейно с нейното увеличаване. Нарича се още грешка от чувствителност.

- *Грешка от нелинейност*

Грешката от нелинейност е максималната разлика между характеристиката на сензора и идеалната линейна характеристика (фиг.2.3). Идеалната линейна характеристика апроксимира функцията на

преобразуване. Най-често тази права се определя по метода на най-малките квадрати, но е възможно да се използват и други методи – например, когато тя свързва двете крайни точки на характеристиката.

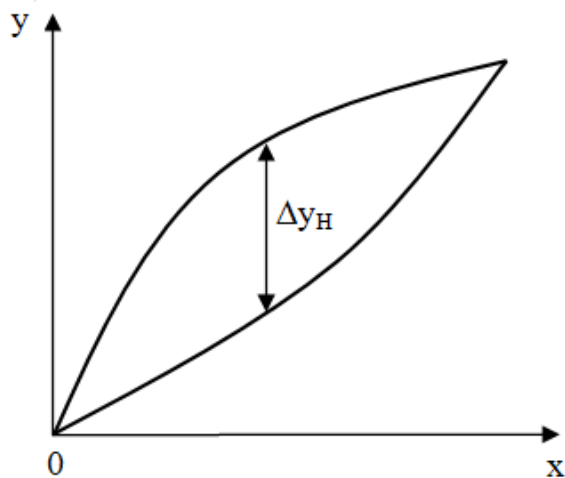


Фиг. 2.3. Грешка от нелинейност

Често се задава приведената грешка от нелинейност, която се определя като отношение, изразено в проценти, на максималната разлика между реалната характеристика на сензора и идеалната линейна характеристика, към диапазона на изменение.

- *Грешка от хистерезис (Hysteresis)*

Вследствие на хистерезисни явления, в сензорите възниква така наречената *грешка от хистерезис*, тъй като при увеличаване („прав ход”) и намаляване („обратен ход”) на измерваната величина (фиг.2.4) функциите на преобразуване може да не съвпадат.



Фиг. 2.4. Грешка от хистерезис

Грешката от хистерезис се дефинира като максималната разлика в изходния сигнал на сензора при увеличаване и последващо намаляване на измерваната величина, отнесена към измервателния диапазон.

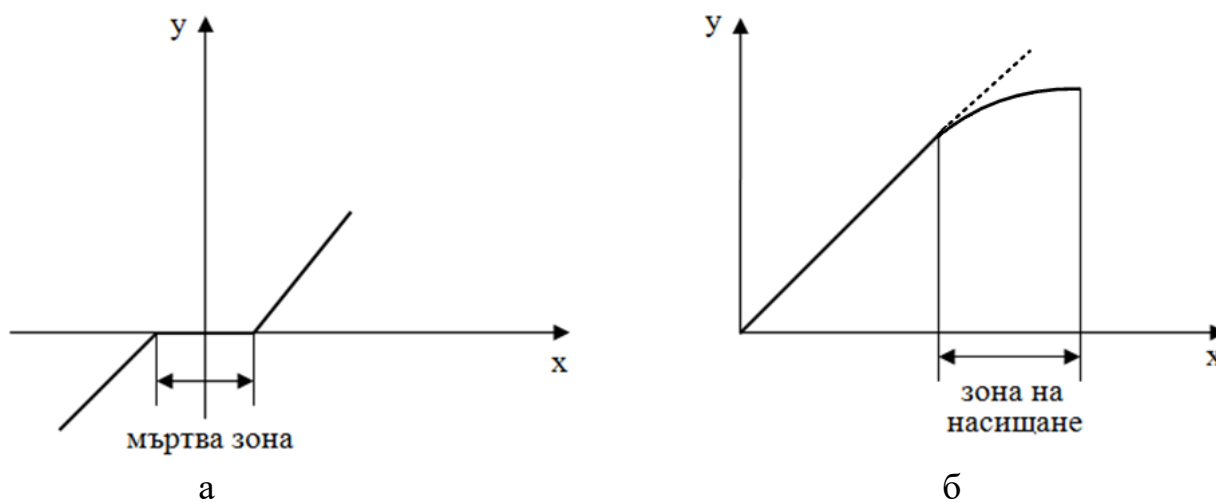
Причина за възникване на хистерезиса е триене, структурни изменения в материала на чувствителния елемент и др.

- *Грешка от повторяемост (Repeatability)*

Грешката от повторяемост е характеристика на сензора, която определя колко добре той възпроизвежда същия изходен сигнал, когато последователно се прилагат идентични входни въздействия при същите условия и в същата посока. За определянето ѝ обикновено се използват два цикъла на измерване. Максималната разлика в изходните сигнали на сензора между тези два цикъла на измерване в нарастваща или намаляваща посока, отнесена към измервателния диапазон, е грешката от повторяемост. Двата цикъла трябва да се извършват при еднакви условия и параметрите на околната среда не трябва да се променят.

2.1.6. Мъртва зона и зона на насищане

Всеки сензор има свои гранични работни характеристики. Долната граница определя мъртвата зона или зоната на нечувствителност, а горната – зоната на насищане (фиг.2.5).



Фиг.2.5. Мъртва зона и зона на насищане на сензор

Мъртвата зона (фиг.2.5а) се проявява в нечувствителността на сензора към малки стойности на входните сигнали. В границите на тази зона изходният сигнал е почти постоянен (нулев). От друга страна, даже ако сензорът се счита за линеен, при определено ниво на входния сигнал изходният сигнал престава да съответства на линейна зависимост. В този случай се казва, че сензорът е влязъл в зоната на насищане (фиг.2.5б).

2.1.7. Стабилност

Стабилността на сензора е способността на изхода му да се получава сигнал с еднаква стойност, когато на входа постъпва една и съща стойност на измерваната величина за определен период от време.

Стабилността зависи основно от процесите на стареене, които променят електрическите, механичните, химичните и термичните свойства на материалите, от които е изготвен сензорът. Изменението на параметрите може да продължава месеци и години. Стабилността е важна характеристика за сензорите, използвани за прецизни измервания. За повишаване на стабилността, сензорите се подлагат на изкуствено стареене чрез циклична работа при екстремални условия.

2.1.8. Работен температурен диапазон

Температурата на околната среда влияе на работните характеристики на сензорите. Работният температурен диапазон е интервалът на околната температура, зададен с висока и ниска гранична стойност, в който сензорът работи със зададена точност. За някои типове сензори се установяват интервали в този диапазон, за всеки от които се указва точността.

За намаляване на температурните грешки на сензорите или на измервателните схеми, към които те се включват, се предвижда температурна компенсация.

2.2. Динамични характеристики и параметри

Динамични се наричат тези характеристики, които се проявяват при работа на сензора в динамичен режим, т.е. когато преобразуваната величина е функция от времето. Динамичните характеристики могат да бъдат представени в различен вид – преходни характеристики, предавателни характеристики, честотни характеристики и др. Динамичните характеристики са свързани с наличието на енергосъхраняващи елементи в сензорите. Те могат да бъдат индуктивност, капацитет, механични елементи като вибрационни маси, топлинни елементи с топлинна мощност.

В теорията на управлението е прието да се описва взаимната връзка между входните и изходните величини на устройството във вид на линейни диференциални уравнение с постоянни коефициенти. При решаването на тези уравнения могат да се определят динамичните характеристики на устройството. В зависимост от конструкцията на сензорите, уравненията, които ги описват, могат да са от различен ред.

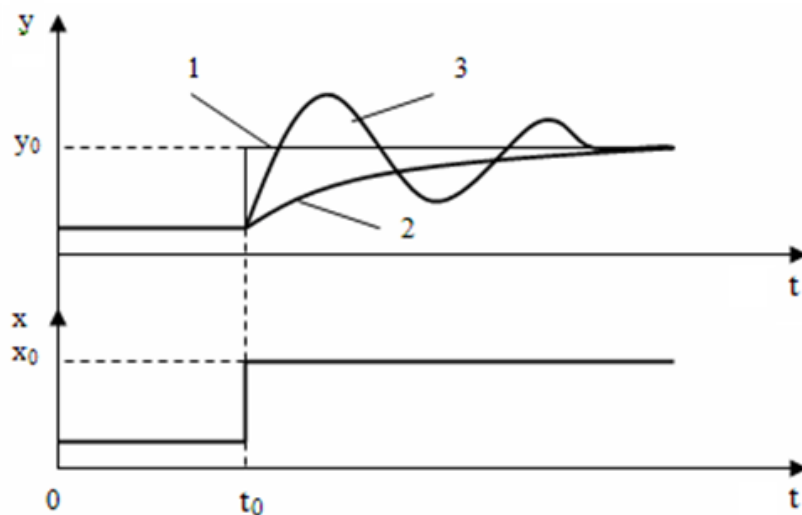
Сензорите от нулев ред имат линейна статична характеристика и се описват с линейна зависимост. В сензора отсъстват енергосъхраняващи елементи. При сензорите от нулев ред не е необходимо да се определят динамични характеристики.

Сензорите от първи ред съдържат един енергосъхраняващ елемент. Описват се с диференциално уравнение от първи ред. Типичен пример за такъв сензор е сензор за температура, в който като енергосъхраняващ елемент е топлоемкостта.

Сензорите от втори ред съдържат два енергосъхраняващ елемент и се описват с диференциално уравнение от втори ред. Пример за такъв сензор е акселерометър, в който са включени маса и пружина.

2.2.1. Преходна характеристика

Показва как се изменя изходният сигнал y на сензора при изменение на входния сигнал x със скок. Възможните типове преходни характеристики са показани на фиг.2.6. С 1 е означена идеалната преходна характеристика, с 2 – апериодичната характеристика, а с 3 – периодичната (колебателна) характеристика.



Фиг.2.6. Преходна характеристика

2.2.2. Импулсна характеристика

Показва как се изменя изходният сигнал на сензора при единично импулсно входно въздействие. Входният сигнал на сензора е във вид на делта функция (фиг.2.7). На фиг.2.7 с 1 е означена апериодичната характеристика, а с 2 - периодичната (колебателна) характеристика.

Преходният процес на сензори от първи ред е апериодичен, а на сензори от втори ред – колебателен (периодичен).

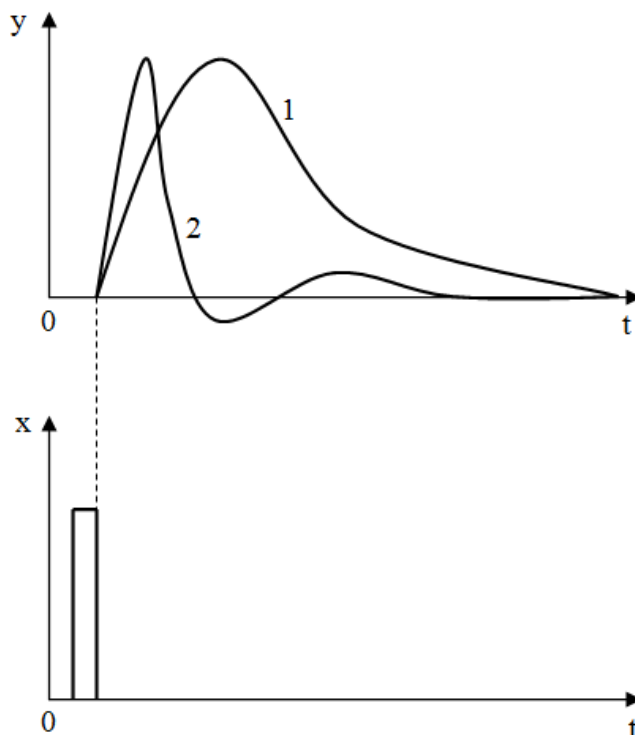
2.2.3. Амплитудно-фазова характеристика

Дефинира се като зависимост, зададена в полярна координатна система, на амплитудата и фазовото отместване между изходния и входния сигнал от честотата.

2.2.4. Амплитудно-честотна и фазово-честотна характеристики

Амплитудно-честотната характеристика е зависимост на амплитудата на изходния сигнал от честотата на входния сигнал.

Фазово-честотната характеристика е зависимост на фазовото отместване между изходния и входния сигнал от честотата.



Фиг.2.7. Импулсна характеристика

2.2.5. Бързодействие на сензора

Бързодействието дава възможност да се оцени как изходната величина на сензора следва във времето изменението на входната (измерваната) величина. Параметрите, които се използват за количествено описание на бързодействието, са:

- *Време за установяване, Време за реакция (Response Time)*

Дефинира се като времето, необходимо за достигане на изходния сигнал на сензора до ниво 90% от диапазона на изменението му при подаване на входа на стъпаловидно външно въздействие. Колкото по-малко е времето на установяване, толкова е по-високо бързодействието на сензора

- *Време за възстановяване (Recovery Time)*

Дефинира се като времето, необходимо за достигане на изходния сигнал на сензора до ниво 10% от диапазона на изменението му при подаване на входа на стъпаловидно външно въздействие (от максималната към минималната стойност).

- *Времеконстанта на сензора*

Времеконстантата е мярка за инерционността на сензора. Времеконстантата определя времето, за което изходната величина от сензора достига 0.63 от стационарната или максимална стойност при подаване на входа му на стъпаловидно външно въздействие.

2.2.6. Честота на среза

Честотата на среза определя най-високата или най-ниската честота на входното въздействие, което сензорът може да възприема без изкривявания. Високата честота, при която изходното напрежение или ток от сензора намаляват с 30%, е максималната честота, която се счита за гранична честота на работата на сензора. За някои сензори съществува и ниска честота на среза, характеризираща най-ниската честота на сигнала, с която той може да работи.

2.2.7. Фазово отместване

Фазовото отместване на определена честота характеризира дефазирането на сигнала от сензора във времето спрямо входното въздействие. Фазовото отместване се измерва или в градуси, или в радиани и се дава за сензори, работещи с периодични сигнали. Ако сензорът е част от измервателна система с обратни връзки, е необходимо да се знаят неговите фазови характеристики. Фазовото отместване на сензора може да намали запаса по фаза на цялата система и да доведе до възникване на нестабилност.

2.2.8. Резонансна честота

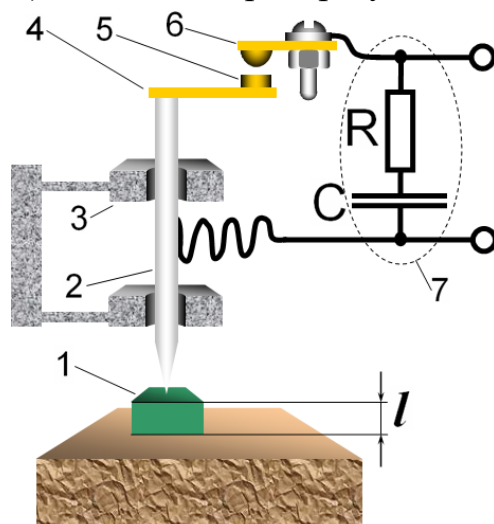
Всеки сензор от втори ред се характеризира с резонансна честота. При резонансна честота значително се увеличава изходният сигнал от сензора. От резонансната честота зависят механичните, топлинните и електрическите свойства на чувствителния елемент. Обикновено работният честотен диапазон на сензора се избира или значително по-ниско от резонансната, или по-високо от нея. За някои типове сензори резонансната честота е работна.

ГЛАВА 3. СЕНЗОРИ ЗА ПОЛОЖЕНИЕ И ПРЕМЕСТВАНЕ

3.1. Контактни преобразуватели

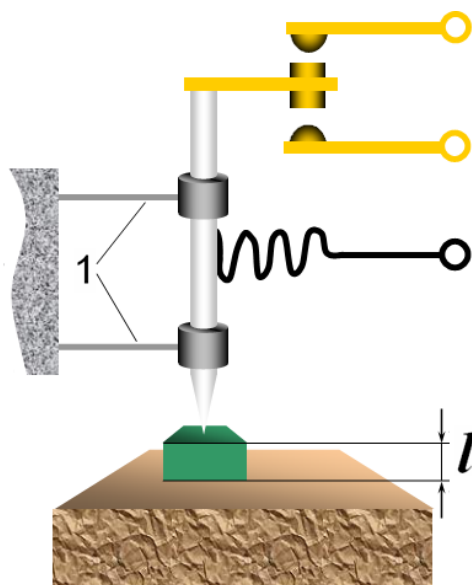
Контактните преобразуватели (контактрони) са преобразуватели, в които линейното или ъгловото преместване (размери) се преобразуват в затворено или отворено състояние на контактите, управляващи дадена електрическа верига.

Реализират се еднообхватни (фиг.3.1), двуобхватни (фиг.3.2) и многообхватни (фиг.3.3) контактни преобразуватели.



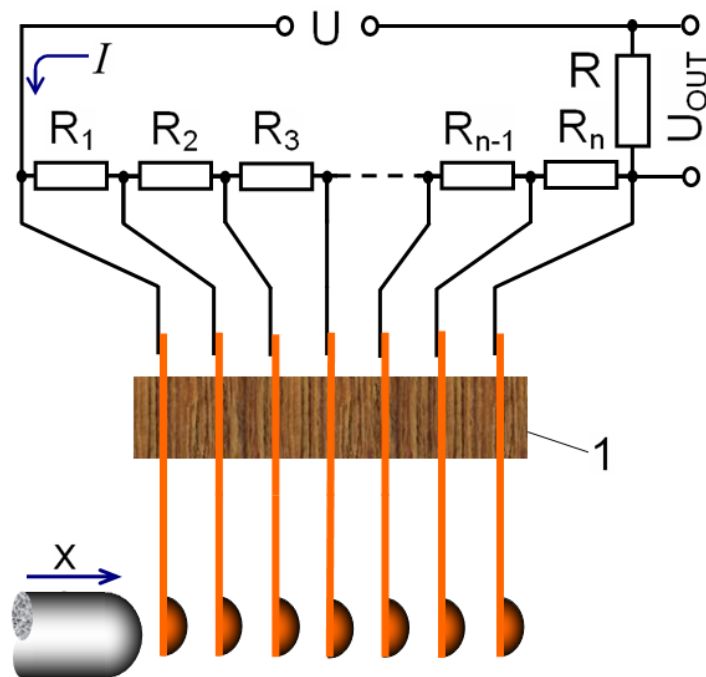
1 – контролиран детайл; 2 – вал; 3 – цилиндрични направляващи; 4 – контактен електрод; 5 – плосък (цилиндричен) контакт; 6 – неподвижен контакт; 7 – искрогасяща група

Фиг.3.1. Еднообхватен контактен преобразувател



1 – плоски пружини

Фиг.3.2. Двуобхватен контактен преобразувател



I – изоляция

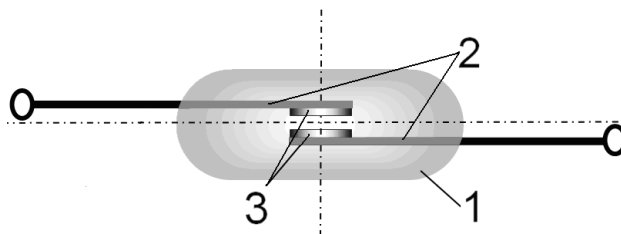
Фиг.3.3. Многообхватен контактен преобразувател

$$U_{out} = \frac{U}{\sum_{i=1}^n R_i + R} \cdot R \quad (3.1)$$

Контактите са от сребро, мед, платина, родий, волфрам, молибден и др. Искрогасящата група служи за предотвратяване на появата на искра и дъга.

Магнитоуправляеми контакти

Представяват разновидност на контактните преобразуватели (фиг.3.4). Наричат се още херкони (херметически затворени контакти) или рийд контакти.



1 – стъклен корпус (ампула); 2 – електродни пластини от магнетомек материал; 3 – контакти

Фиг.3.4. Магнитоуправляем контактен преобразувател (херкон)

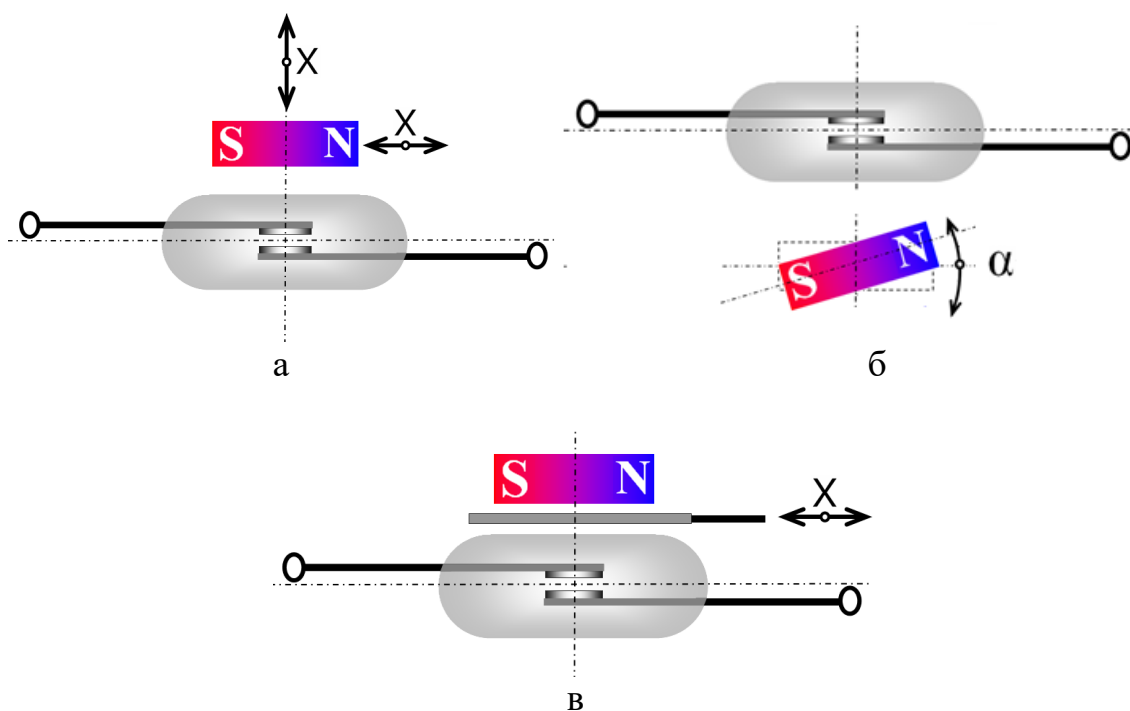
Стъклената ампула е с диаметър около 3 mm и дължина около 20 mm. Тя

е пълна или с инертен газ (азот, аргон или водород) или е херметизирана. В нея са пресовани електродните пластини. Те са изготвени са от магнитомек материал (най-често – пермалой). Магнитното поле се затваря през тях и през въздушната междина между контактите. Контактните повърхности са нанесени върху електродните пластини по фотохимичен път. Материали за контактното покритие са сребро, злато, платина, платинородий или техни сплави. Електродите играят ролята на магнитопроводи, контакти и пружини.

Контактите са изолирани от въздуха и поради това не могат да се окисляват, няма искрене и са изолирани от прах.

Управлението на контактите се извършва чрез външно магнитно поле, създадено от постоянен магнит. Изменението на магнитното поле се осъществява по два начина:

- чрез преместване или завъртане на постоянен магнит, създаващ магнитното поле (фиг.3.5а, б);
- чрез преместване на екран, поставен между постоянния магнит и ампулата (фиг.3.5в).



Фиг.3.5. Управление на контактите на херкона: а) чрез преместване на постоянен магнит; б) чрез завъртане на постоянен магнит; в) чрез преместване на екран, поставен между постоянния магнит и ампулата

Като предимства на мегнитоуправляемите контакти могат да се посочат малките габарити, ниската цена, добрата защитеност от окисляване и прах, голямият брой превключвания – $10^6 \dots 10^9$, доброто бързодействие – $0,2 \dots 0,5 \mu s$ и др

3.2. Потенциометрични преобразуватели

3.2.1. Потенциометрични преобразуватели с механични контакти

Потенциометърът е резистор с постоянно съпротивление R_p , по който се премества плъзгач, създаващ електрически контакт. Този плъзгач механично се свързва с изследвания обект (например – детайл), чието преместване той трябва да предава.

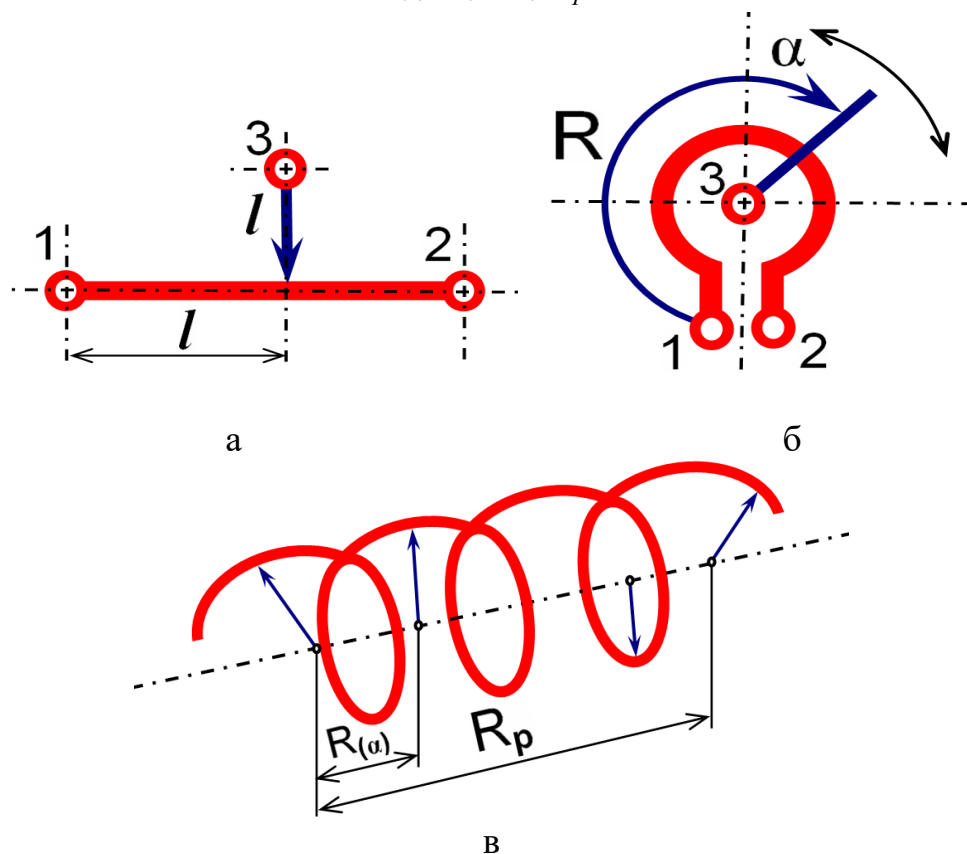
Съпротивлението R между плъзгача и единия край на резистора се явява функция от:

- положението на плъзгача;
- конструкцията на резистора.

Ако резисторът има еднородна конструкция, то потенциометърът е линеен, тъй като съществува правопрпорционална зависимост между съпротивлението R и положението на плъзгача. В този случай в зависимост от траекторията на преместването на плъзгача, се различават:

- потенциометри за линейно преместване (фиг.3.6а)

$$R(l) = (l / L) R_p \quad (3.2)$$



Фиг.3.6. Потенциометри: а) за линейно преместване; б) кръгови потенциометри; в) многооборотни потенциометри

- потенциометри за ъглово преместване

$$R(\alpha) = (\alpha / \alpha_m) R_p \quad (3.3)$$

Към тази подгрупа се отнасят:

= кръговите потенциометри ($\alpha_m < 360^\circ$) (фиг.3.6 б)

= многооборотните потенциометри ($\alpha_m > 360^\circ$) (фиг.3.6 в).

Резисторът в потенциометричните преобразуватели може да бъде или проводник, или проводяща лента.

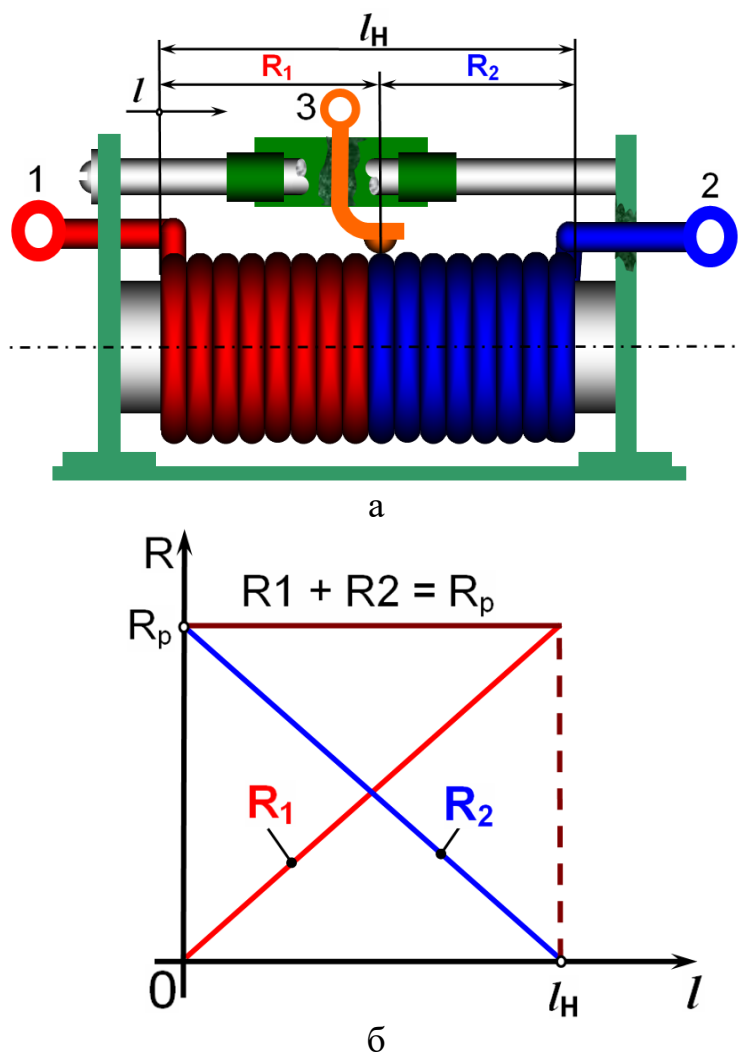
Когато в тези преобразуватели се използва тънък калибриран проводник с плъзгач, те се наричат още *реоходни преобразуватели (реоходни)*.

Когато проводникът е навит върху основа (каркас), то те се наричат *реостатни*.

Реостатните преобразуватели са реостати със специално изпълнение и предназначение, чиито плъзгач се премества под действието на входната величина - линейно или ъглово преместване или друга величина (сила, налягане и др.), предварително преобразувана в линейна или ъглова. Следователно функцията на преобразуване на тези преобразуватели е

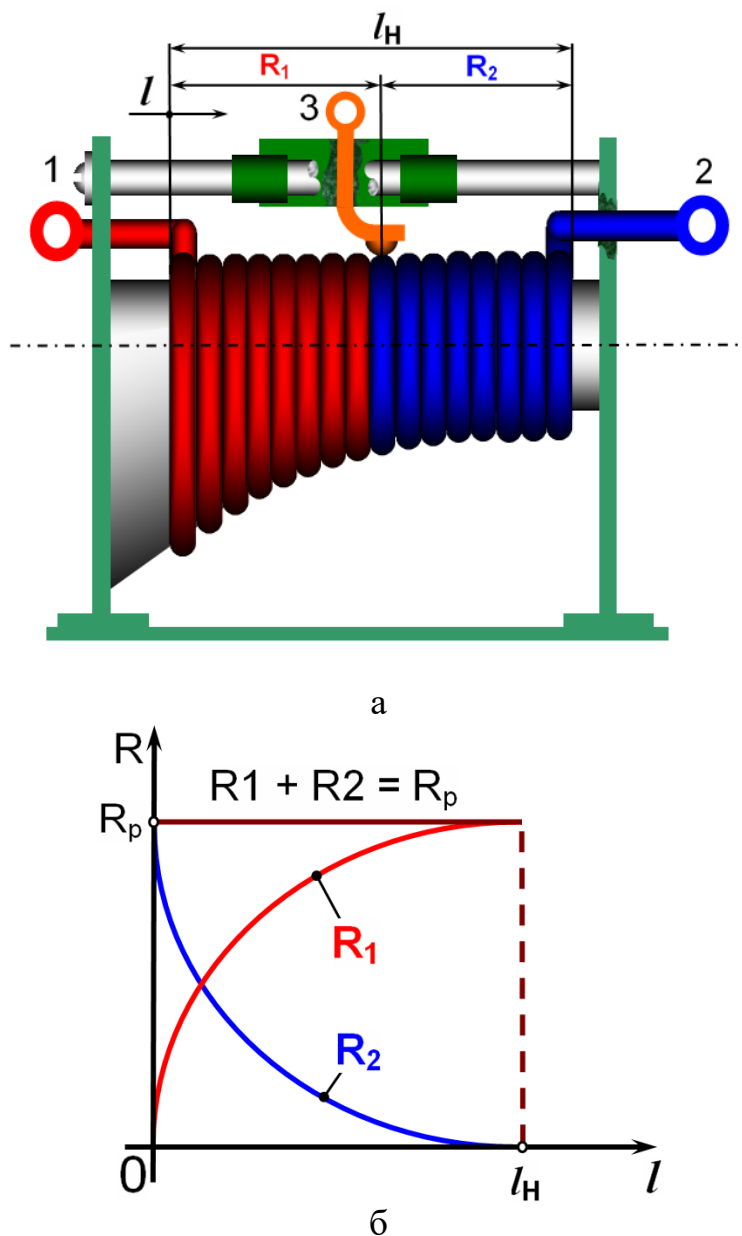
$$R = f(X), \quad (3.4)$$

където X е линейното или ъгловото преместване.



Фиг.3.7. Линеен реостат: а) конструкция; б) характеристики

Най-често се използват линейни реостати, при които съпротивителният проводник е навит с равномерна стъпка върху каркас с еднакво сечение по цялата дължина (фиг.3.7а). От плъзгача са изведени два извода, като се получават две изходни съпротивления R_1 и R_2 . На фиг.3.7б са показани графиките на изменението на тези съпротивления. Зависимостите $R_1 = f_1(l)$ и $R_2 = f_2(l)$ са линейни, а R_p е общото съпротивление на реостата.



Фиг.3.8. Функционален реостат: а) конструкция; б) характеристики

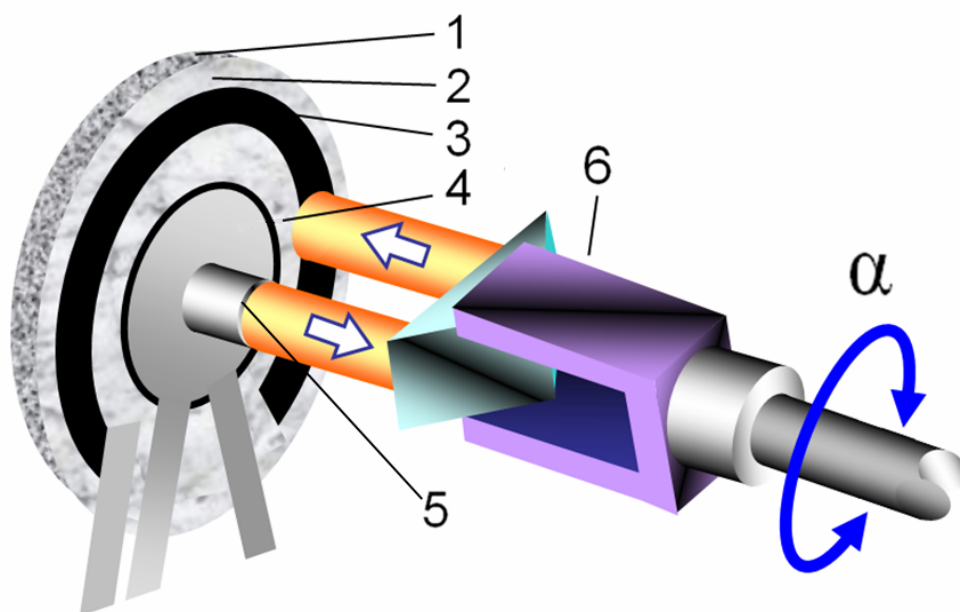
Изготвят се и функционални реостати, чиято функция на преобразуване е умишлено нелинейна. Това може да се постигне чрез подходяща форма на каркаса (фиг.3.8), чрез определена стъпка на навивките или чрез шунтиране на части от линеен реостат с резистори.

3.2.2. Потенциометрични преобразуватели без механични контакти

Основават се на различни ефекти. Техни основни предимства са отсъствието на триене и на износване на контактните повърхнини. Това са безконтактни преобразуватели.

- *Потенциометри с фотоефект (ъглов потенциометър с оптична връзка)*

При тях под действието на светлината рязко намалява съпротивлението на фоточувствителния слой (фиг.3.9).



1 – неподвижен диск; 2 – пръстен от проводим материал (контактна зона); 3 – фоточувствителен пръстен (зона); 4 – съпротивителна зона (измервателна зона); 5 – светодиода. Излъчва светлинен сноп; 6 – въртящ се елемент, върху който са разположени две огледала, сключващи ъгъл 90°

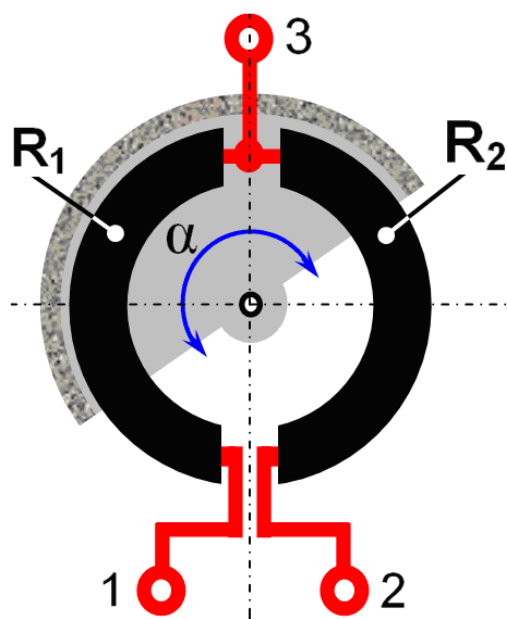
Фиг.3.9. Ъглов потенциометър с оптична връзка

Мястото, където е попаднал светлинният лъч върху фоточувствителната зона, става проводимо и по този начин се получава контакт върху зоната 4 и зоната 2. По този начин светлинният лъч играе ролята на плъзгач.

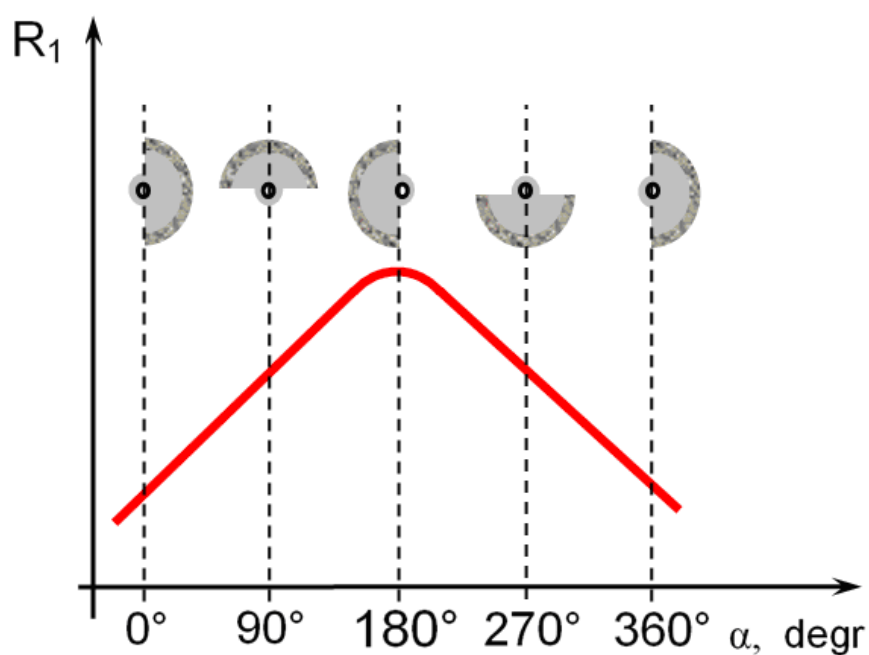
- *Магнитни потенциометри*

В тях се използват магниторезистори. Това са резистори, чието съпротивление се изменя под действието на магнитното поле. Когато такъв резистор се намира в магнитно поле, неговото съпротивление рязко се увеличава.

Конструкция на магнитен потенциометър, включващ камера с форма на полудиск, в която влизат с два магнитни резистора R_1 и R_2 , е представена на фиг.3.10.



Фиг.3.10. Магнитен потенциометър



0° - камерата обхваща R_2 и съпротивлението R_1 има минимална стойност;
 90° - съпротивлението има средна стойност като $R_1=R_2$;
 180° - R_1 има максимална стойност;
 270° - отново съпротивлението приема средна стойност и $R_1=R_2$;
 360° - отново съпротивлението R_1 има минимална стойност

Фиг.3.11. Изменение на съпротивлението R_1 на магнитния потенциометър в зависимост от ъгловото отклонение α

По горната и долната повърхност на камерата са разположени полюсите

на магнита, който създава магнитно поле, пресичащо магниторезисторите. Точка 3 е обща за тях. При завъртане на диска R_1 и R_2 се изменят разнопосочно. Колкото по-голяма част от магниторезистора е покрита от магнитното поле, толкова съпротивлението му е по-голямо. На фиг.3.11 е показано изменението на съпротивлението R_1 в зависимост от ъгловото отклонение α .

На фиг.3.12 са показани линейни потенциометри, на фиг.3.13 – кръгови потенциометри, а на фиг.3.14 – многооборотни потенциометри, производство от различни фирми.



Фиг.3.12. Линейни потенциометри

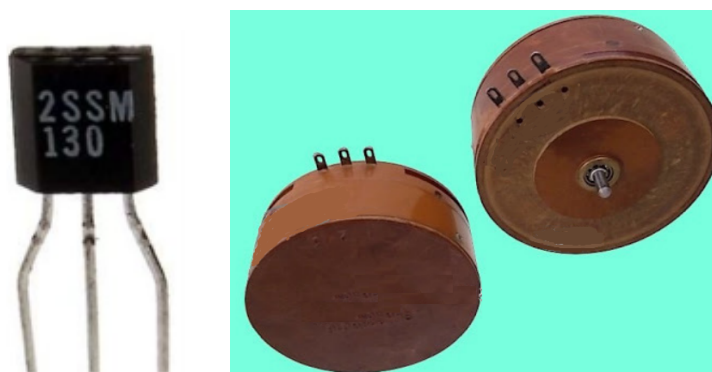


Фиг.3.13. Кръгови потенциометри



Фиг.3.14. Многооборотни потенциометри

Външният вид на магниторезистори е представен на фиг.3.15.



Фиг.3.15. Магниторезистори

3.3. Индуктивни и взаимноиндуктивни преобразуватели

Индуктивните преобразуватели представляват бобина, разположена върху магнитопровод с въздушна междина, като параметрите на бобината се изменят под действие на входната величина, която обикновено е линейно или ъглово преместване или друга, превърната в преместване, величина.

При въздействието на входната величина X се изменят параметрите на въздушната междина (дължината ѝ δ или нейното сечение s), а оттам - магнитното съпротивление на тази междина и на цялата затворена магнитна верига на бобината. Вследствие на това се изменят индуктивността и пълното електрическо съпротивление на бобината.

Общото магнитно съпротивление е

$$R_{\mu} = R_{\delta} + R_M, \quad (3.5)$$

където R_{δ} е магнитното съпротивление на въздушната междина, R_M -

магнитното съпротивление на магнитопровода на бобината (обикновено от листовата стомана).

Тъй като общото магнитно съпротивление се определя основно от това на въздушната междина ($R_\delta \gg R_M$), то

$$R_\mu \approx R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 s}, \quad (3.6)$$

където δ е дължината на въздушната междина, μ_0 - магнитната константа (магнитната проницаемост на вакуума), s - сечението на въздушната междина.

Тези преобразуватели работят при променлив ток, като импедансът на бобината е

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (3.7)$$

където R е активното съпротивление на бобината, L - нейната индуктивност, ω - кръговата честота, като $\omega = 2\pi f$, а f - честотата.

Тъй като за бобината е изпълнено

$$\omega L \gg R,$$

то

$$z \approx \omega L = \frac{\omega W^2}{R_\mu} \approx \frac{\omega W^2 \mu_0 s}{\delta}, \quad (3.8)$$

където W е броят на навивките на бобината.

Следователно при промяна на δ и s ще се променя импедансът на бобината. Поради това се използват конструкции на преобразуватели с промяна на един от двата параметъра.

Възможна е реализация както на единични, така и на диференциални преобразуватели. Изхождайки от функцията на преобразуване (3.8), при единичните преобразуватели зависимостта $z = f(\delta)$ е нелинейна, а зависимостта $z = f(s)$ - линейна.

Диференциалните преобразуватели дават възможност за увеличаване на чувствителността, подобряване на линейността на функцията на преобразуване, както и намаляване на грешките.

Всеки *индуктивен* преобразувател може да се преобразува във *взаимноиндуктивен*, ако върху магнитопровода се разположи втора (измервателна) бобина, в която се индутира електродвижещо напрежение. Първата бобина се нарича възбудителна (намагнитваща). При диференциалните преобразуватели се добавят две допълнителни вторични бобини.

При единичен преобразувател взаимната индуктивност M на двете бобини е

$$M = \frac{W_1 W_2}{R_\mu}, \quad (3.9)$$

където W_1 и W_2 е съответно броят на навивките на намагнитващата и измервателната бобина.

Индуктираното във вторичната намотка на преобразувателя електродвижещо напрежение (е.д.н.) е

$$E = \omega M I \approx \omega W_1 W_2 I \mu_0 \frac{s}{\delta}, \quad (3.10)$$

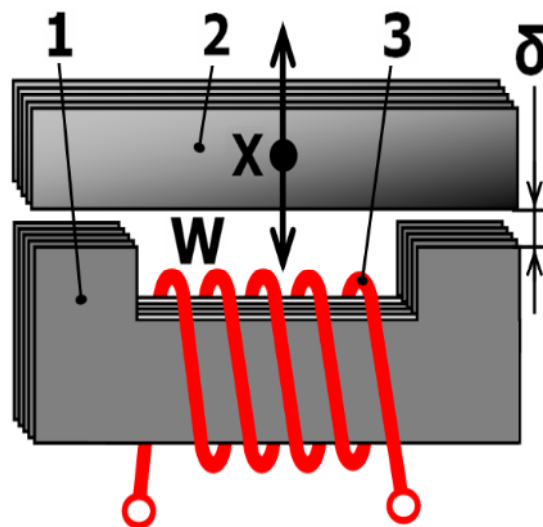
където I е намагнитващият ток.

Следователно, при промяната на δ или s се променя индуктираното е.д.н. Зависимостта $E = f(\delta)$ е нелинейна, а зависимостта $E = f(s)$ - линейна.

Конструкции на измервателните преобразуватели

3.3.1. Преобразуватели с магнитопровод с изменяща се дължина δ на въздушната междина

Те са най-разпространените от индуктивните преобразуватели. На фиг.3.16 е показан единичен индуктивен преобразувател от този тип.



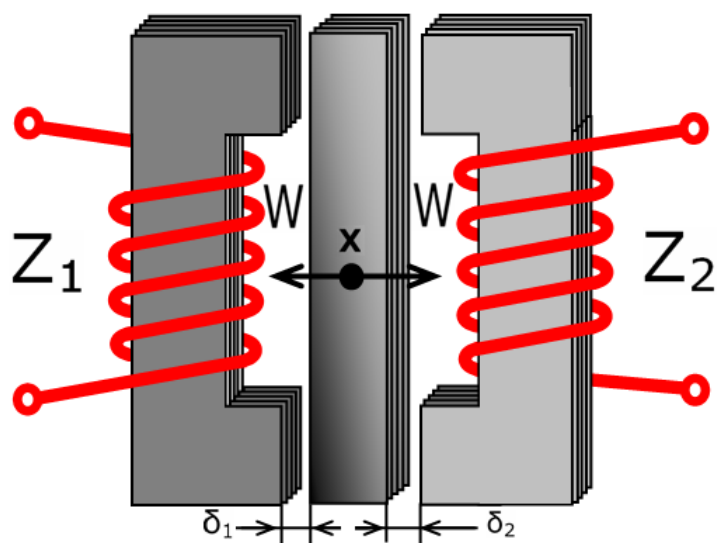
1 – магнитопровод; 2 – котва; 3 – бобина

Фиг.3.16. Единичен индуктивен преобразувател с магнитопровод с изменяща се дължина на въздушната междина

Котвата се премества под въздействие на входната величина X , чрез което се изменя дължината на въздушната междина δ и съгласно (3.8) – импедансът на бобината.

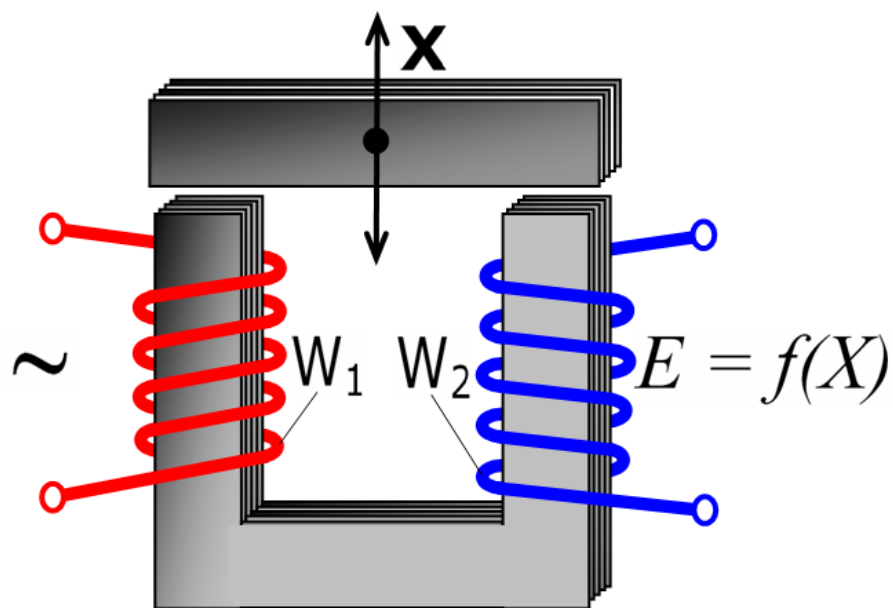
На фиг.3.17 е показана схема на диференциален индуктивен

преобразувател с изменяща се дължина на въздушната междина.

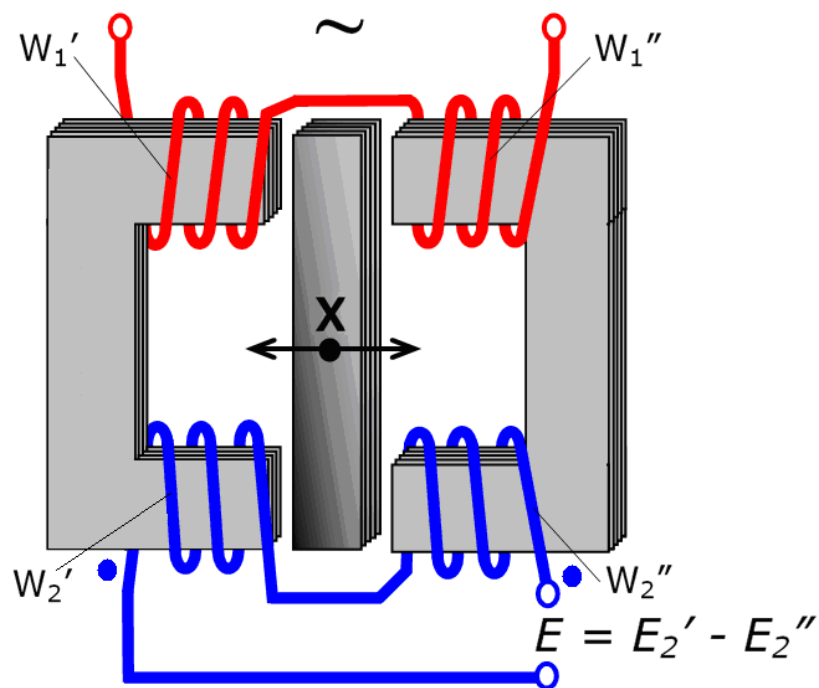


Фиг.3.17. Диференциален индуктивен преобразувател с магнитопровод с изменяща се дължина на въздушната междина

На фиг.3.18 и фиг.3.19 са показани съответно *взаимноиндуктивен единичен* и *диференциален преобразувател* за линейни премествания с изменяща се дължина на въздушната междина.



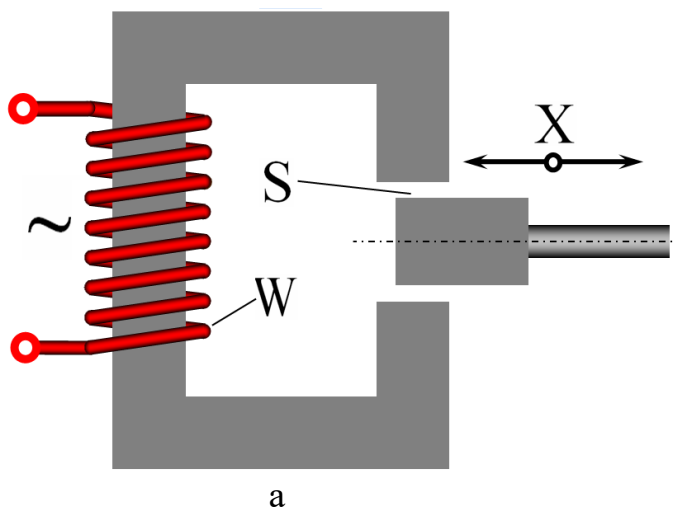
Фиг.3.18. Взаимноиндуктивен единичен преобразувател за линейни премествания с изменяща се дължина на въздушната междина

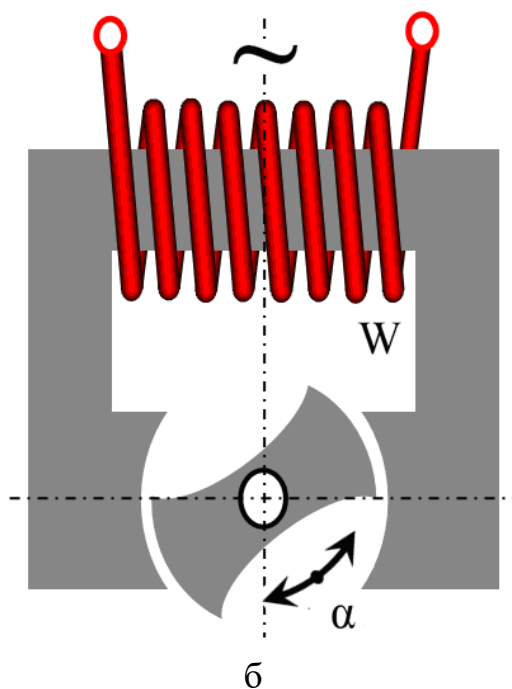


Фиг.3.19. Взаимноиндуктивен диференциален преобразувател за линейни премествания с изменяща се дължина на въздушната междина

3.3.2. Преобразуватели с магнитопровод с изменящо се сечение s на въздушната междина

На фиг.3.20 са показани единични, а на фиг.3.21 – диференциален индуктивен преобразувател от този тип.

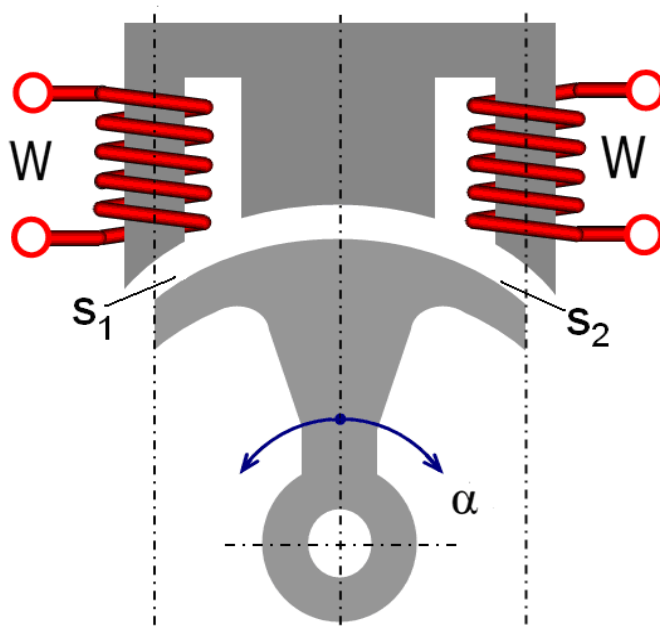




Фиг.3.20. Единични преобразуватели с магнитопровод с изменяща се площ на въздушната междина: а) за линейни премествания; б) за ъглови премествания

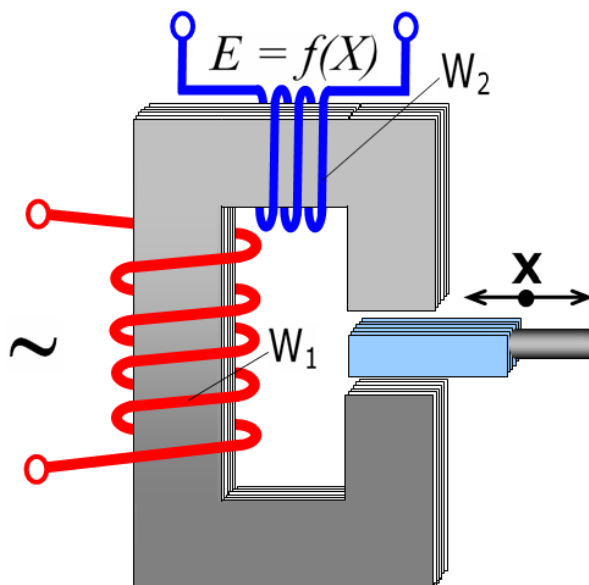
Единичният индуктивен преобразувател от фиг.3.20а е за линейно преместване. Под въздействие на входната величина X котвата се премества наляво или надясно, с което се намалява или увеличава s .

Единичният индуктивен преобразувател от фиг.3.20б е за ъглово преместване.



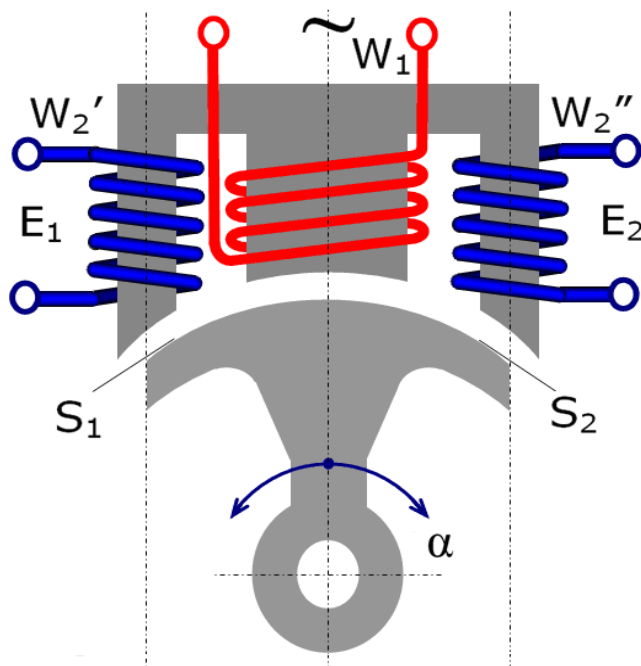
Фиг.3.21. Диференциален индуктивен преобразувател за ъглово преместване с промяна на площите s_1 и s_2 на въздушните междини

Диференциалният индуктивен преобразувател (фиг.3.21) от този тип е за ъглово преместване, което води до промяна на сеченията s_1 и s_2 на въздушните междини.



Фиг.3.22. Единичен взаимноиндуктивен преобразувател за линейни премествания

На фиг.3.22 е показан единичен взаимноиндуктивен преобразувател за линейни премествания, а на фиг.3.23 - диференциален взаимноиндуктивен преобразувател за ъгови премествания с промяна на площта на въздушната междина.



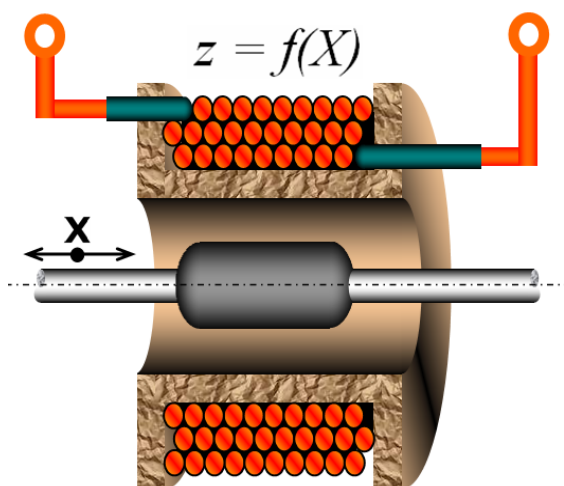
Фиг.3.23. Диференциален взаимноиндуктивен преобразувател за ъгови премествания

3.3.3. Преобразуватели с подвижно ядро

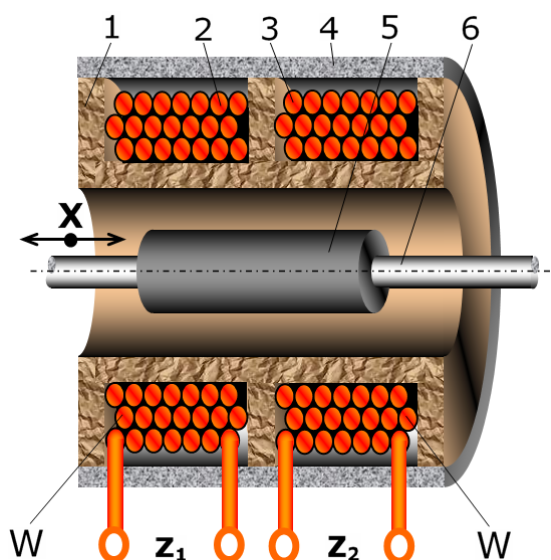
Схема на индуктивен единичен преобразувател с подвижно ядро е показана на фиг.3.24.

Използва се за измерване на по-големи линейни премествания (до няколко mm).

Диференциален преобразувател от този тип е показан на фиг.3.25. Когато котвата се премества, индуктивността на едната бобина се увеличава, а на другата – намалява. Двете бобини се включват в две съседни рамена на мост за променлив ток.



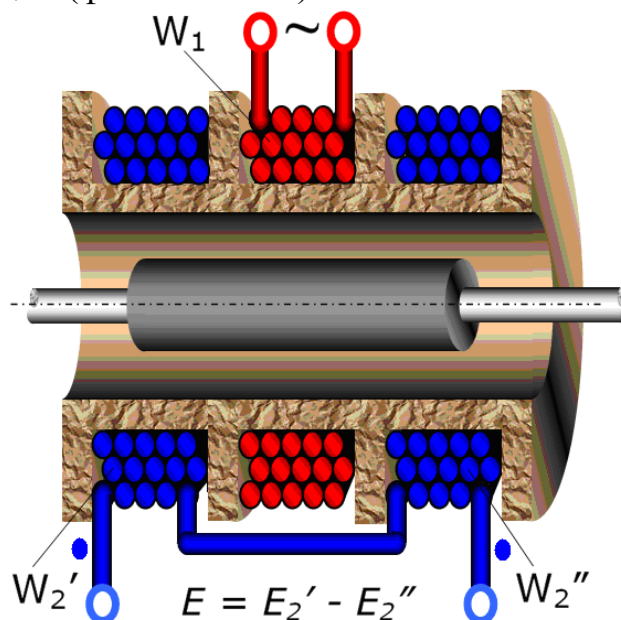
Фиг.3.24. Индуктивен единичен преобразувател с подвижно ядро



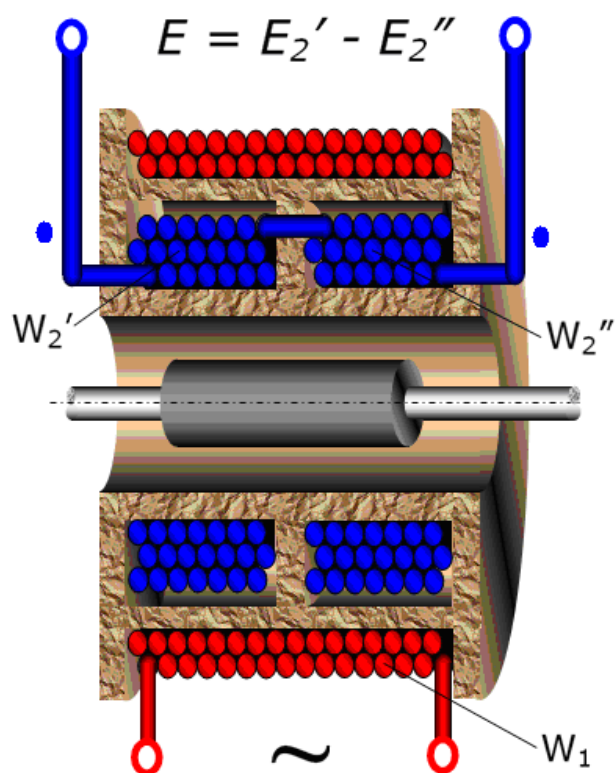
1 – основа (каркас) от изолационен материал; 2 и 3 – бобини с еднакъв брой навивки W ; 4 – неподвижен цилиндър; 5 – подвижно цилиндрично ядро от феромагнитен материал; 6 – водачи от немагнитен материал (най-често – месинг)

Фиг.3.25. Индуктивен диференциален преобразувател с подвижно ядро

Ако към конструкцията се добави намагнитваща бобина W_1 , а разгледаните бобини са измервателни W_2 , то преобразувателят се превръща във взаимноиндуктивен и често се нарича *линейно изменящ се диференциален трансформатор* (ЛИДТ). Може да се реализира в различни конструкции (фиг.3.26а и б.)



а



б

Фиг.3.26. Конструкции на линейно изменящ се диференциален трансформатор (ЛИДТ)

3.4. Капацитивни преобразуватели

Капацитивни се наричат преобразувателите, при които изменението на измерваната неелектрическа величина се преобразува в изменение на капацитета на кондензатор.

При пренебрегване на краевия ефект, капацитетът C на кондензаторите с плоско-паралелни електроди се определя с израз

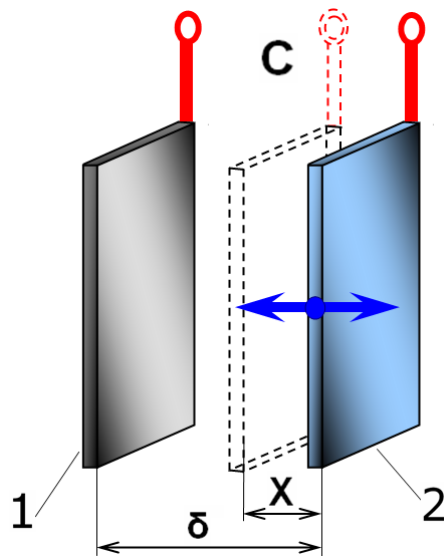
$$C = \frac{\varepsilon s}{\delta} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r s}{\delta}, \quad (3.11)$$

където ε е диелектричната проницаемост на средата между електродите, s - площта им, δ - разстоянието между тях, $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m - диелектричната проницаемост на вакуума, ε_r - относителната диелектрична проницаемост на средата между електродите (за въздуха $\varepsilon_r = 1,0006$).

Следователно капацитетът C може да се промени чрез изменение на ε , s и δ . Функцията на преобразуване $C = f(\delta)$ е нелинейна, а функциите на преобразуване $C = f(s)$ и $C = f(\varepsilon)$ - линейни.

3.4.1. Капацитивни преобразуватели с изменение на разстоянието между електродите за измерване на линейни премествания

На фиг.3.27 е показан единичен капацитивен преобразувател с изменение на δ .



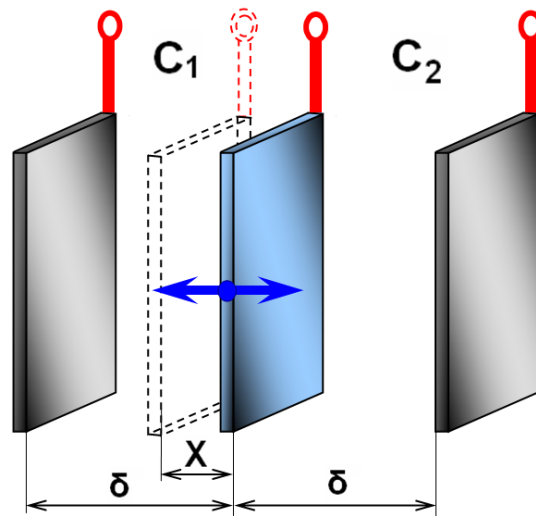
1 - неподвижен електрод; 2 - подвижен електрод

Фиг.3.27. Единичен капацитивен преобразувател с изменение на разстоянието между електродите

Функцията на преобразуване е

$$C = \varepsilon_0 \frac{s}{\delta \mp x}. \quad (3.12)$$

Преобразувателят се отличава с малка област на линейност.
На фиг.3.28 е представен *диференциален преобразувател*.



Фиг.3.28. Диференциален капацитивен преобразувател с изменение на разстоянието между електродите

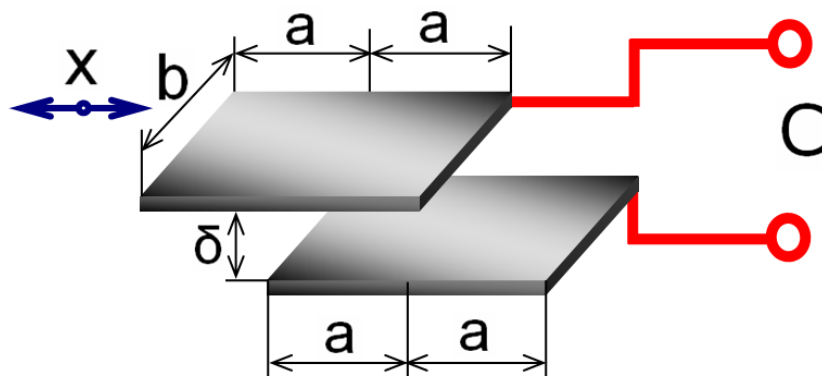
За него са в сила зависимостите

$$C_1 = C \pm \Delta C = \varepsilon_0 \frac{S}{\delta \mp x} \quad (3.13)$$

$$C_2 = C \mp \Delta C = \varepsilon_0 \frac{S}{\delta \pm x} \quad (3.14)$$

3.4.2. Капацитивни преобразуватели с изменение на застъпената площ на електродите за измерване на линейни и ъглови премествания

На фиг.3.29 е показан *единичен капацитивен преобразувател* с изменение на застъпената площ на електродите за *линейни премествания*.

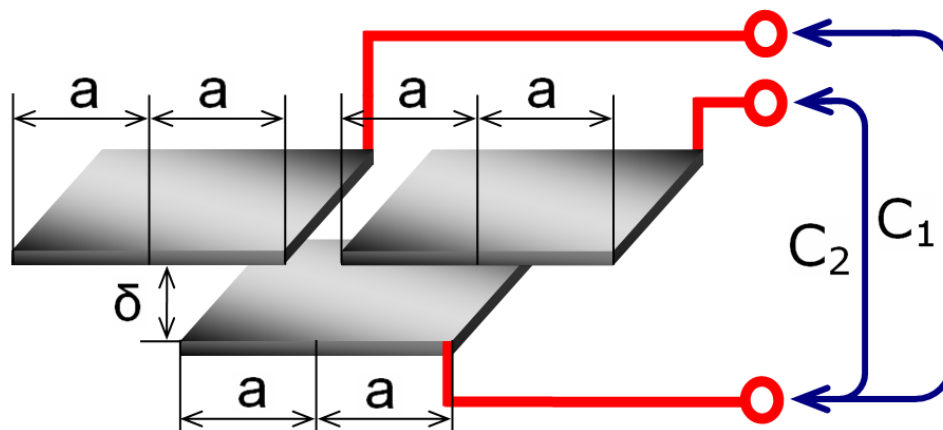


Фиг.3.29. Единичен капацитивен преобразувател с изменение на застъпената площ на електродите за линейни премествания

Функцията на преобразуване е

$$C = \varepsilon_0 \frac{(a \pm x)b}{\delta} . \quad (3.15)$$

При преместването на електрода капацитетът винаги намалява, без значение, в коя посока е преместването x . Този недостатък се отстранява при *диференциалния преобразувател* от този тип (фиг.3.30).



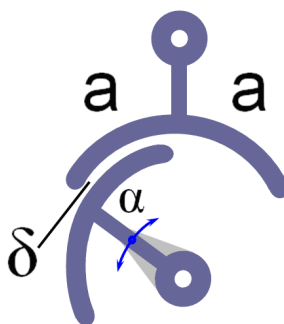
Фиг.3.30. Диференциален капацитивен преобразувател с изменение на застъпената площ на електродите за линейни премествания

За него са в сила зависимостите

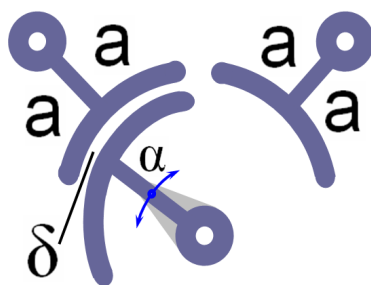
$$C_1 = C \pm \Delta C = \varepsilon_0 \frac{(a \pm x)b}{\delta} \quad (3.16)$$

$$C_2 = C \mp \Delta C = \varepsilon_0 \frac{(a \mp x)b}{\delta} . \quad (3.17)$$

На фиг.3.31 е показан *единичен* капацитивен преобразувател с изменение на s за *ъглови* премествания, а на фиг.3.32 – *диференциален* от същия тип.



Фиг.3.31. Единичен капацитивен преобразувател с изменение на застъпената площ на електродите за ъглови премествания



Фиг.3.32. Диференциален капацитивен преобразувател с изменение на застъпената площ на електродите за ъглови премествания

Функцията на преобразуване за единичния преобразувател от този тип е

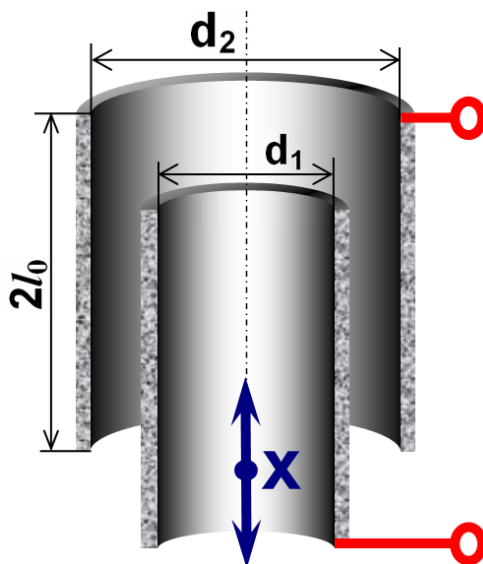
$$C = \varepsilon_0 \frac{(a \pm r \alpha) b}{\delta}, \quad (3.18)$$

а за диференциалния преобразувател - съответно

$$C_1 = \varepsilon_0 \frac{(a \pm r \alpha) b}{\delta} \quad (3.19)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \frac{(a \mp r \alpha) b}{\delta}. \quad (3.20)$$

Широко приложение имат и цилиндричните (коаксиалните) капацитивни преобразуватели (фиг.3.33).



Фиг.3.33. Единичен цилиндричен капацитивен преобразувател

Капацитетът им се определя с израза

$$C = \varepsilon_0 \frac{2\pi(l_0 \pm X)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (3.21)$$

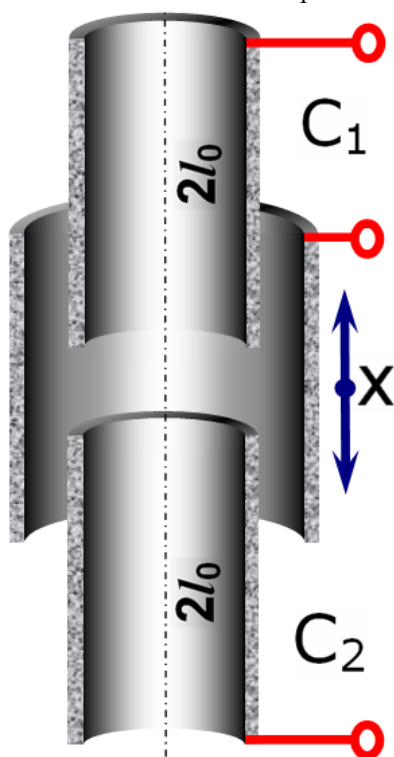
където $(l_0 \pm X)$ е дължината на застъпване на двата електрода, а d_1 и d_2 са диаметрите на вътрешния и външния електроди.

При тези преобразуватели може да се движи както вътрешният, така и външният цилиндър.

Този преобразувател може да се направи диференциален, ако се постави и трети цилиндър, при условие, че само единият е подвижен (фиг.3.34). При това

$$C_1 = \varepsilon_0 \frac{2\pi(l_0 \pm X)}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (3.22)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \frac{2\pi(l_0 \mp X)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (3.23)$$



Фиг.3.34. Диференциален цилиндричен капацитивен преобразувател

3.4.3. Капацитивни преобразуватели с изменение на диелектричната проникваемост ε за измерване на малки премествания и ниво

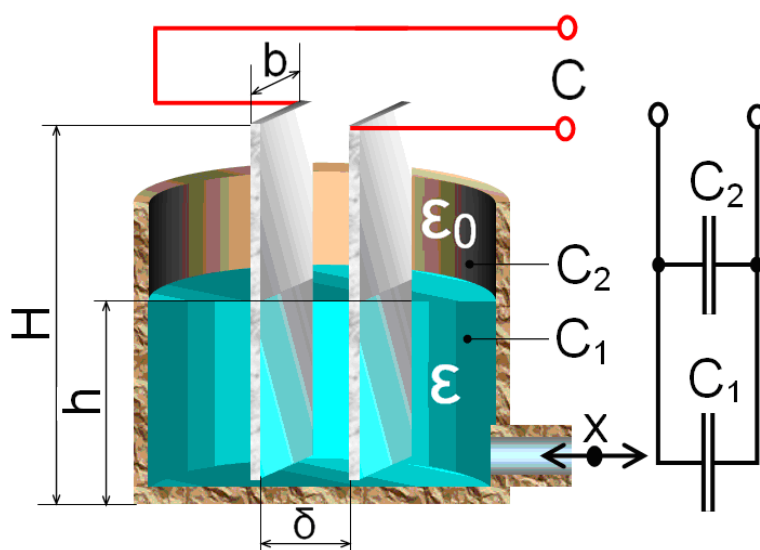
Пример на такъв преобразувател е показан на фиг.3.35. При използване на плоско-паралелни електроди с ширина b , за капацитивния преобразувател от този тип може да се запише

$$C_1 = \varepsilon \frac{bh}{\delta} \quad (3.24)$$

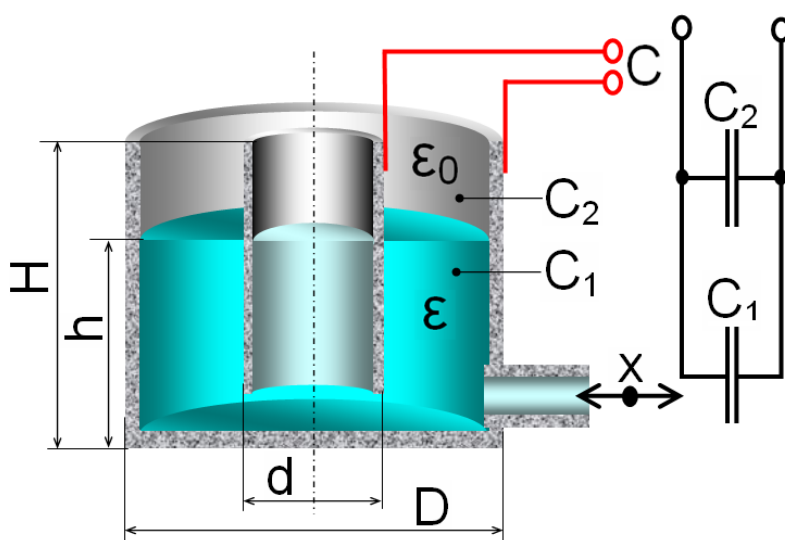
$$C_2 = \varepsilon_0 \frac{(H-h)b}{\delta} \quad (3.25)$$

$$C = C_1 + C_2 = \frac{b}{\delta} [\varepsilon h + \varepsilon_0 (H-h)] = \frac{b}{\delta} [\varepsilon_0 H + (\varepsilon - \varepsilon_0)h], \quad (3.26)$$

където C_1 е капацитетът на кондензатора с диелектрик - съответната течност или насипен материал; C_2 - капацитетът на въздушния кондензатор, съответстващ на кондензатора над повърхността на течността или насипния материал, като двата кондензатора са свързани паралелно.



Фиг.3.35. Капацитивен преобразувател с плоско-паралелни електроди с изменение на диелектричната проницаемост



Фиг.3.36. Капацитивен цилиндричен преобразувател с изменение на диелектричната проницаемост

Аналогично при използване на цилиндричен кондензатор (фиг.3.36) капацитетът му може да се представи с израз

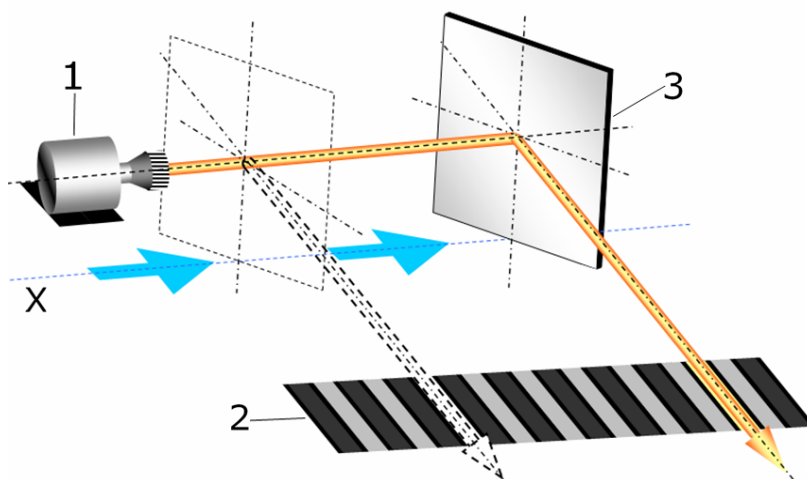
$$C = \frac{2\pi}{\ln \frac{D}{d}} [\varepsilon_0 H + (\varepsilon - \varepsilon_0) h] . \quad (3.27)$$

И двата преобразувателя (от фиг.3.35 и фиг.3.36) могат да се използват за измерване както на малки премествания X , водещи до промяна на нивото h на течности, така и на нивото на течности и на насипни материали с диелектрични свойства, т.е. с относителна диелектрична проницаемост ε_r , по-голяма от единица.

Преобразуването $C = f(h)$ и в двата случая е линейно.

3.5. Оптичен преобразувател на положение

Обобщена схема на такъв преобразувател е показана на фиг.3.37.



1 – лазер; 2 – фотодиоди; 3 - преграда

Фиг.3.37. Оптичен преобразувател на положение

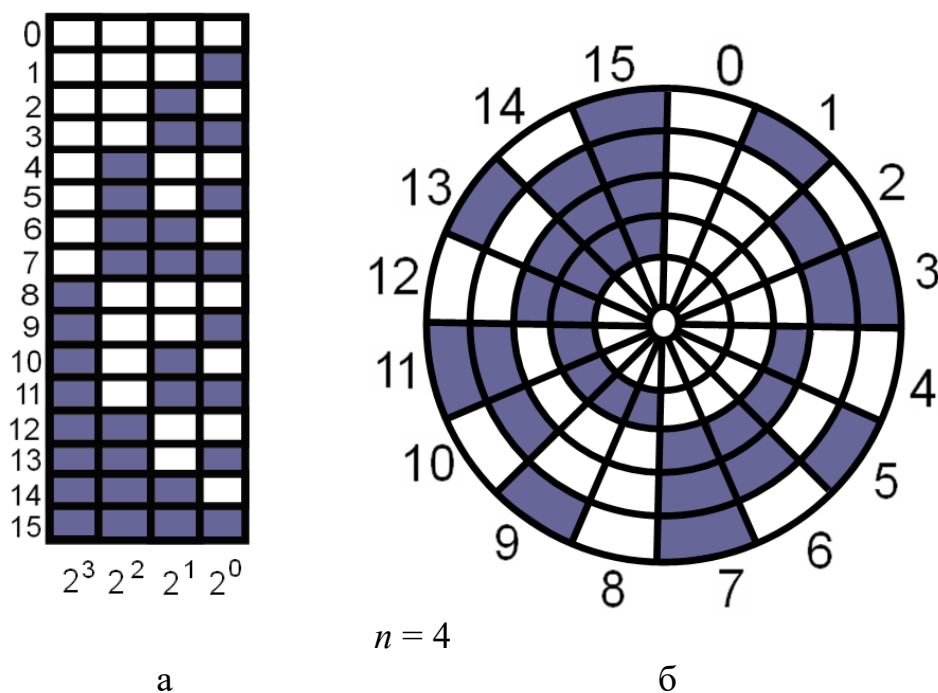
Като светлинен източник се използва лазер. Лъчът, формиран от него, се отразява от преграда, която се премества заедно с обекта, чието положение се определя. В зависимост от това положение отразеният лъч пада върху съответни фотодиоди, които са приемници на излъчването.

3.6. Абсолютни и инкрементални (относителни) енкодери

В случай на премествания е възможно да се създаде преобразувател, измерващ преместване – линейно или ъглово, в който изходният сигнал е директно цифров. Към тях се отнасят така наречените абсолютни енкодери.

Абсолютните енкодери могат да бъдат линейни (фиг.3.38а) или ротационни (фиг.3.38б). На фигурата са представени такива енкодери с

използване на двоичен код.



Фиг.3.38. Абсолютни енкодери: а) за линейно преместване; б) за ъглово преместване

Всичките n бита, образуващи всяка от думите, се реализират съответно на n успоредни или концентрични пътечки при използване на две различни състояния за определяне на логическите 0 или 1:

- ненамагнитваща се или феромагнитна повърхност – при магнитното четене;
- изолираща или проводяща повърхност – при електрическото четене;
- непрозрачна или пропускаща светлината повърхност – при оптичното четене.

Оптичното четене се използва много често, като за всяка пътечка има източник – светодиоди, и приемник – фототранзистор.

Броят на елементите N във всяка пътечка определя разделителната способност:

- за линейните с дължина L тя е L/N ;
- за ъгловите – $360^\circ/N$.

При използване на прав двоичен код получената информация се обработва с помощта на изчислително устройство. Но тъй като при изменение на числото с една единица при определени комбинации се изменят едновременно много битове, може да възникне грешка от неправилното четене.

Опасността от грешно четене може да се избегне:

- или като се използва код, в който при всяко елементарно

преместване се изменя само един бит (обикновено това са специални кодове – например, код на Грей);

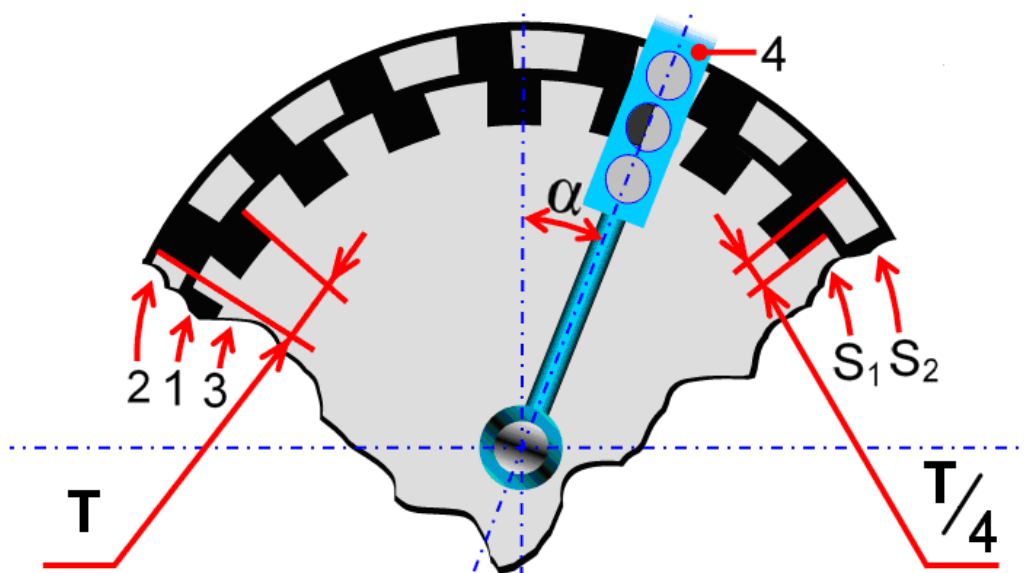
-или като се използва прав двоичен или BCD код, но се включва допълнително четящо устройство, позволяващо да се избягва двусмисленото четене в преходните зони (носители на код с две пътечки с управлявано четене) – например така нареченият U-виден запис.

Инкременталните (относителните) енкодери дават възможност за определяне на преместването, както и на скоростта на въртене на даден обект, с помощта на неголям брой пътечки (2 или 3) с по-малко сложна маска в сравнение с абсолютните енкодери.

Две концентрични (при ротационните) или успоредни (при линейните) пътечки са разделени по на N равни елементарни площадки (стъпки), последователно – непрозрачни и пропускащи светлината, образуващи растр. При това площадките от едната пътечка са изместени на четвърт пространствен период ($T/4$) една спрямо друга. Понякога се добавя трета пътечка (с единствена прозрачна площадка) с цел да е възможно броенето на оборотите и установяване на нулата на брояча (фиг.3.39).

Следователно тези преобразуватели могат да се използват за:

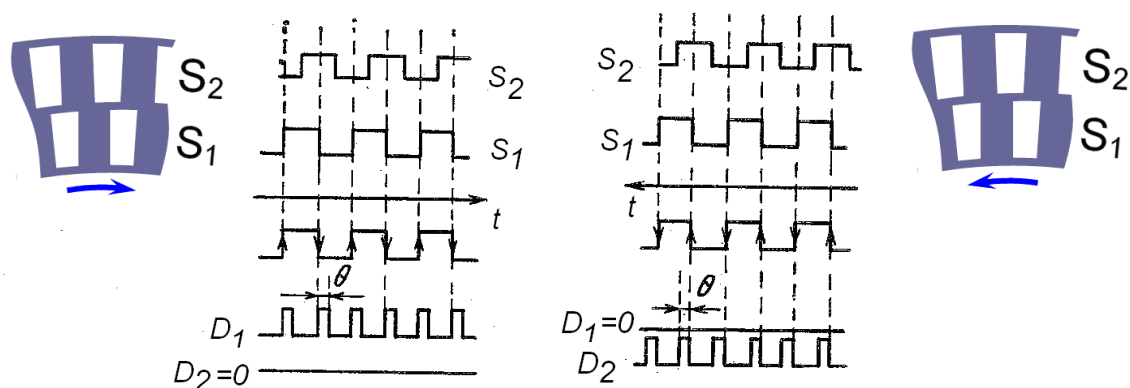
- определяне на преместването и скоростта на преместването;
- определяне на посоката на движението;
- нулиране и броене на оборотите.



Фиг.3.39. Инкрементален (относителен) енкодер

Четенето за всяка пътечка се осъществява най-често с помощта на оптична двойка: източник (светодиод) и приемник (фототранзистор), разположени от противоположните страни на диска (рейката).

За определянето на посоката на преместването се използва електронна схема, която позволява, изхождайки от сигналите S_1 на пътека 1, да се разпознаят техните предни $\{\uparrow: (dS_1/dt) > 0\}$ или задни $\{\downarrow: (dS_1/dt) < 0\}$ фронтове, които да се свържат със състоянието S_2 (0 или 1) на пътека 2 в същия момент (фиг.3.40).



Фиг.3.40. Времедиаграми на работа на електронна схема за определяне на посоката на преместването

3.7. Индукционни преобразуватели

Принципът на действие на индукционните преобразуватели се основава на закона за електромагнитната индукция.

Те представляват съчетание на постоянен магнит и бобина. Изменението на входната величина, която може да бъде линейно или ъглово преместване, изменя потока, обхванат от бобината, вследствие на което в нея се индутира е.д.н., пропорционално на скоростта на изменение на входната величина. Това са генераторен тип преобразуватели.

Индуктираното е.д.н. се определя с израза

$$e = -W \frac{d\Phi_t}{dt}, \quad (3.28)$$

където $\frac{d\Phi_t}{dt}$ е скоростта на изменение на магнитния поток. Тази скорост зависи от скоростта на изменение на входната величина.

Отчитайки зависимостта (3.28), при синусоидален поток

$$\Phi_t = \Phi_m \sin \omega t \quad (3.29)$$

за индуктираното електродвижещо напрежение се получава

$$e = -W \omega \Phi_m \cos \omega t. \quad (3.30)$$

Индуктираното е.д.н. зависи от скоростта на изменение на магнитното поле. Честотата му също зависи от тази скорост.

Видове индукционни преобразуватели

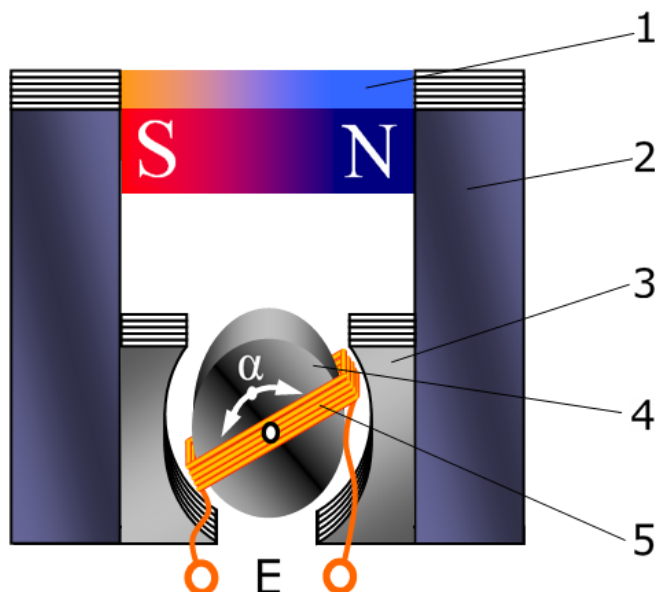
- С промяна на взаимното разположение между постоянния магнит и

бобината под действие на входната величина. От своя страна този вид включва два подвида:

- с неподвижен магнит и подвижна бобина;
- с неподвижна бобина и подвижен магнит.
- С неподвижни магнит и бобина и подвижен трети елемент, чието положение се променя под действието на входната величина.

3.7.1. Индукционни преобразуватели с подвижна бобина

- при ъгови премествания

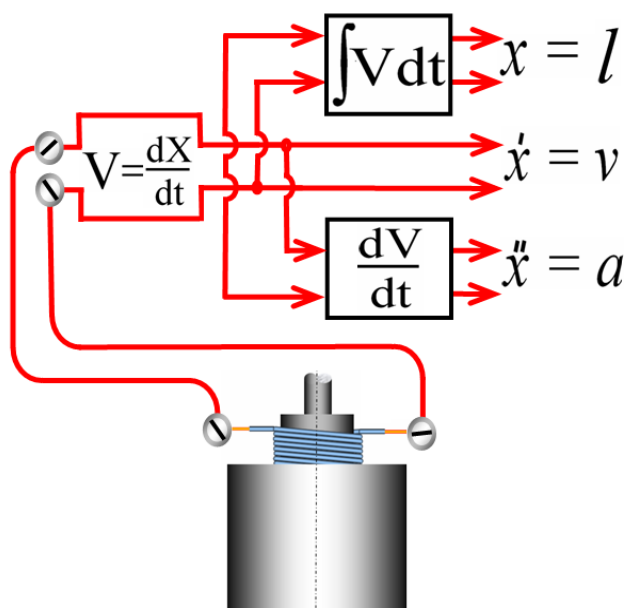
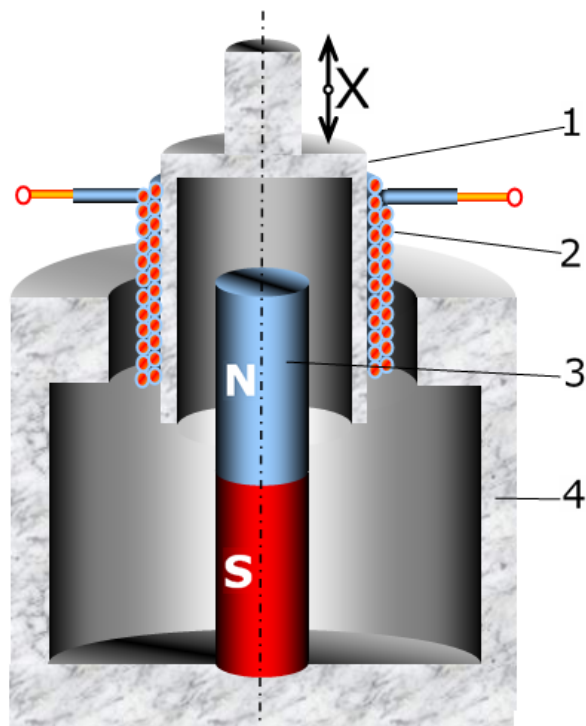


1 - постоянен магнит; 2, 3 и 4 – ферромагнитни елементи; 5 - бобина, която се завърта под въздействие на входната величина

Фиг.3.41. Индукционен преобразувател с подвижна бобина за ъгови премествания

- при линейни премествания

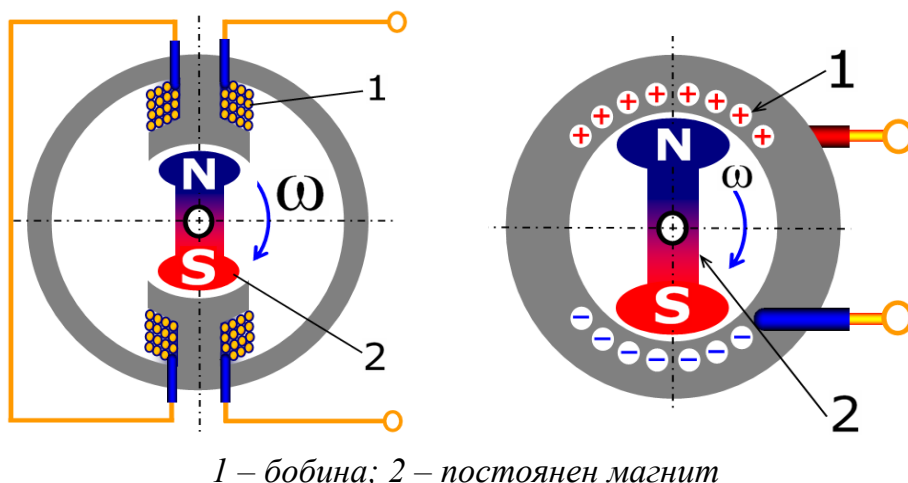
Индуктираното е.д.н. е пропорционално на скоростта $v = \frac{dX}{dt}$. Чрез използване на интегриращ или диференциращ преобразувател, на изхода може да се получи сигнал, пропорционален съответно на преместването X или ускорението a .



1 – основа на подвижната бобина; 2 - подвижна бобина, свързана с измененията, предизвикани от входната величина; 3 - постоянен магнит; 4 - магнитопровод

Фиг.3.42. Индукционен преобразувател с подвижна бобина за линейни премествания

3.7.2. Индукционни преобразуватели с подвижен магнит



Фиг.3.43. Индукционни преобразуватели с подвижен магнит

В случая, аналогично се получава, че индуктираното е.д.н. е пропорционално на ъгловата скорост, т.е.

$$e = S_{\omega} \cdot \omega, \quad (3.31)$$

където ω е ъгловата скорост.

3.7.3. Индукционни преобразуватели с изменение на положението на трети елемент

При тези преобразуватели постоянният магнит и бобината са неподвижни:

- при линейни премествания (фиг.3.44)

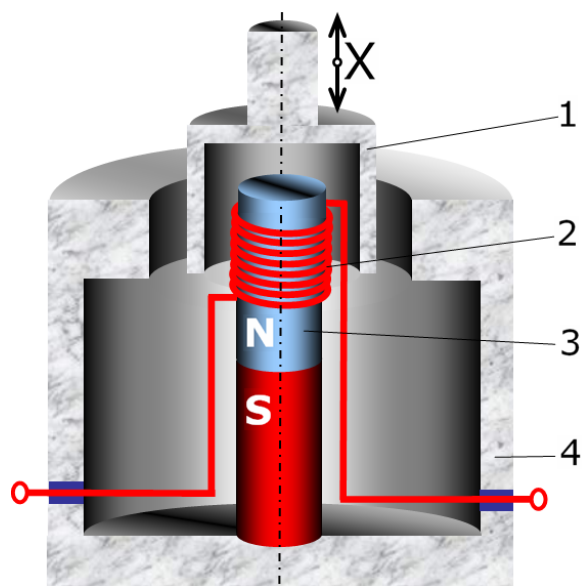
Магнитопроводът е с цилиндрична форма. Върху средната цилиндрична част, която представлява постоянен магнит, е разположена неподвижна бобина. В междината между магнита и магнитопровода се движи подвижна част, представляващ феромагнитен елемент (котва). При това движение на котвата се изменя магнитното съпротивление на въздушната междина, което води до промяна на магнитния поток.

- за измерване на скоростта на въртене (фиг.3.45)

Постоянният магнитен поток Φ е един и същ, но той се разпределя различно между двете колони в зависимост от това, коя част (зъб или канал) на подвижния елемент попада под съответната колона. Магнитното съпротивление на въздушната междина между колоната на магнитопровода и зъбното колело е минимална, когато под колоната попада зъб и максимално – когато има канал. В останалите случаи това съпротивление е междинно. С това се променят магнитните потоци Φ_1 и Φ_2 през бобините, свързани противоположно (несъгласувано) и се индутира е.д.н.

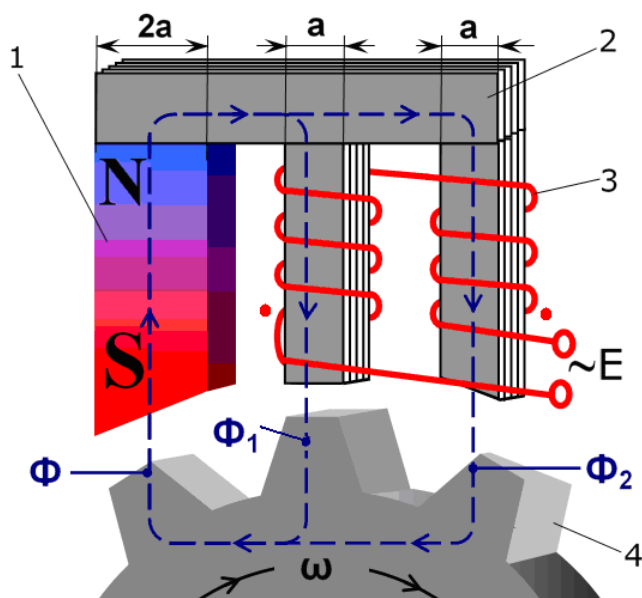
$$E = f(\omega), \quad (3.32)$$

което зависи от ъгловата скорост ω на въртене на диска.



1 – подвижен ферромагнитен елемент; 2 – бобина; 3 – постоянен магнит; 4 – магнитопровод

Фиг.3.44. Индукционен преобразувател с изменение на положението на трети елемент при линейни премествания



1 – постоянен магнит; 2 – магнитопровод; 3 – бобини; 4 – подвижен елемент (зъбно колело) от ферромагнитен материал

Фиг.3.45. Индукционен преобразувател с изменение на положението на трети елемент за измерване на скоростта на въртене

ГЛАВА 4. СЕНЗОРИ ЗА СИЛА, МЕХАНИЧНИ НАПРЕЖЕНИЯ И ТАКТИЛНИ СЕНЗОРИ

4.1. Тензорезисторни преобразуватели

Тензорезисторите са проводникови или полупроводникови преобразуватели, чието действие се основава на явлението тензоефект.

Тензоефектът се състои в промяна на активното съпротивление на преобразувателя поради изменение на геометричните му размери и специфичното му съпротивление при механичната му деформация в еластичната област. Получената по този начин промяна на съпротивлението се характеризира с относително малки стойности. Количествена характеристика на тензоефекта представлява коефициентът на относителна тензочувствителност k , който се определя с изрази

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (4.1)$$

където $\varepsilon_R = \Delta R/R$ е относителното изменение на съпротивлението на тензорезистора, а $\varepsilon_l = \Delta l/l$ относителното изменение на неговата дължина. За голяма част от проводниковите тензорезистори k има стойности от 1.9 до 2.5.

Тензорезисторите се разделят на:

- проводникови (нишковидни);
- тънкослойни (фолиеви);
- полупроводникови.

4.1.1. Проводникови тензорезистори

На фиг.4.1 е показан видът на най-разпространените проводникови (нишковидни) тензопреобразуватели.

За проводник се използват сплави като манганин, константан и други сплави, които имат малък температурен коефициент на съпротивление (ТКС) и голямо специфично съпротивление.

Дължината A на полагането на проводника се нарича база, а B – ширина на преобразувателя.

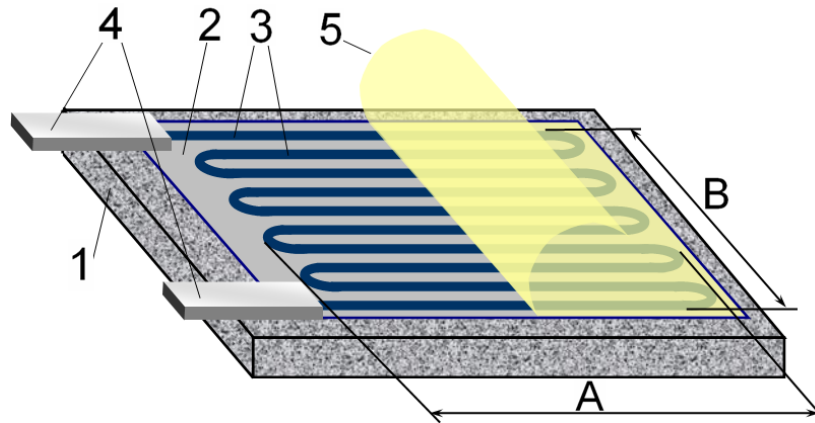
Тензорезисторът се залепя с лепило върху изследвания детайл, чиято деформация ще се измерва. Направлението на дължината му трябва да е успоредно на направлението, в което действат механичните напрежения.

При известен коефициент k на тензорезистора и измервайки изменението на съпротивлението ΔR на тензопреобразувателя, може да се определи относителното изменение на дължината му

$$\varepsilon_l = \frac{\varepsilon_R}{k} = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{k}, \quad (4.2)$$

а също механичното напрежение на опън или натиск

$$\sigma = E \varepsilon_l = \frac{E}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R}. \quad (4.3)$$



1 – изследван детайл; 2 – основа (тънка изолационна хартиена или пластмасова подложка, често здрава пергаментна хартия или лак – $\Delta = 40 \dots 50 \mu m$); 3 – проводник ($d = 0,01 \dots 0,03 mm$); 4 – изводи от калайдисан меден проводник ($d = 0,1 \dots 0,3 mm$); 5 – покривен слой – кондензаторна хартия или лак ($\Delta = 10 \dots 15 \mu m$).

Фиг.4.1. Проводников тензорезистор

При измерване на сила F тя се определя като

$$F = \sigma s, \quad (4.4)$$

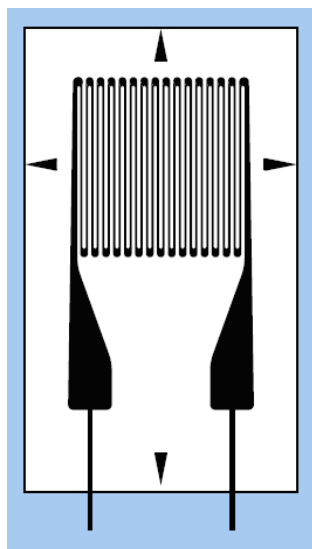
където s е напречното сечение на детайла (обекта).

Трябва да се отбележи, че поради невъзможността от използването на даден тензорезистор върху повече от един обект се използва стойността на k , определена чрез статистическо ѝ усредняване за дадена партида образци, като градуировката се извършва върху 8-10% от образците в партидата.

Недостатък на този вид тензопреобразуватели е значителната им напречна чувствителност. Този недостатък може да бъде отстранен в значителна степен при проводников тензорезистор с медни мостчета, разположени в напречните участъци.

4.1.2. Тънкослойни (фолиеви) тензорезистори

Голямо приложение в практиката са намерили и тънкослойните (фолиеви) тензорезистори (фиг.4.2).



Фиг.4.2. Тънкослоен (фолиев) тензорезистор

Те се изработват по фотохимичен път, като металното фолио се покрива с фоточувствителен слой, върху който се фотографира формата на преобразувателя. Тяхно предимство е по-голямата ширина на проводника в напречните участъци, водещо до намаляване на съпротивлението в тези участъци и оттам – на напречната чувствителност.

4.1.3. Полупроводникови тензорезистори

Полупроводниковите тензорезистори се изготвят аналогично на фолиевите. Тяхното приложение се разширява като се използват полупроводникови тензопреобразуватели, изготвени от германий, силиций, галиев арсенид и други полупроводникови материали. Те имат обикновено 50-60 пъти по-голяма тензочувствителност от металните тензорезистори при много малка база (2,5 mm). Техният коефициент на тензочувствителност е силно зависим от температурата, а характеристиката $\varepsilon_R = f(\varepsilon_l)$ е нелинейна.

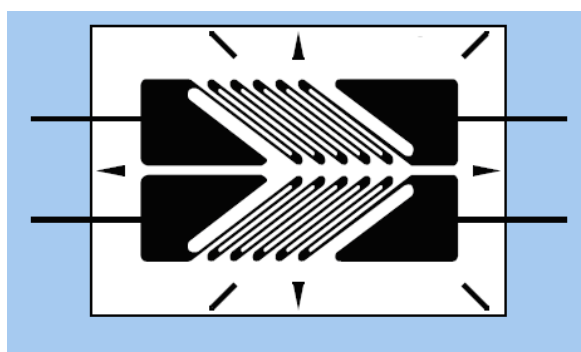
На базата на фолиевите или полупроводниковите тензорезистори се правят различни конфигурации на тензорезистори и комбинации от тях, наречени още тензорезисторни розетки.

На фиг.4.3 е показан преобразувател с 3 тензорезистора, разположени на 120° един спрямо друг, образувачи розетка, чрез която може да се определи резултантното механично напрежение в дадена тясна област (точка), подложена на сложни механични напрежения.

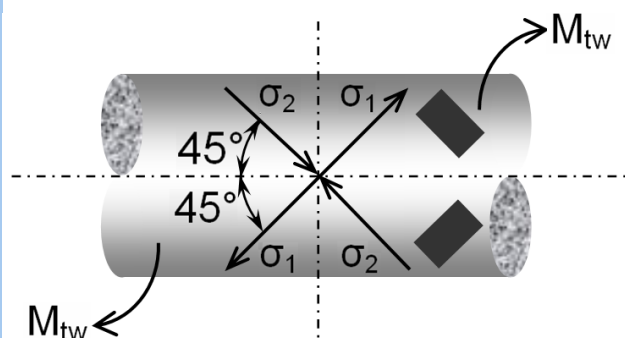
На фиг.4.4 е показан преобразувател, състоящ се от два тензорезистора, разположени под ъгъл 90° . Те се използват главно за определяне на механични напрежения във валове на машини, в които се създава въртящ момент (фиг.4.5).



Фиг.4.3. Розетка от три тензорезистора за определяне на резултатното механично напрежение

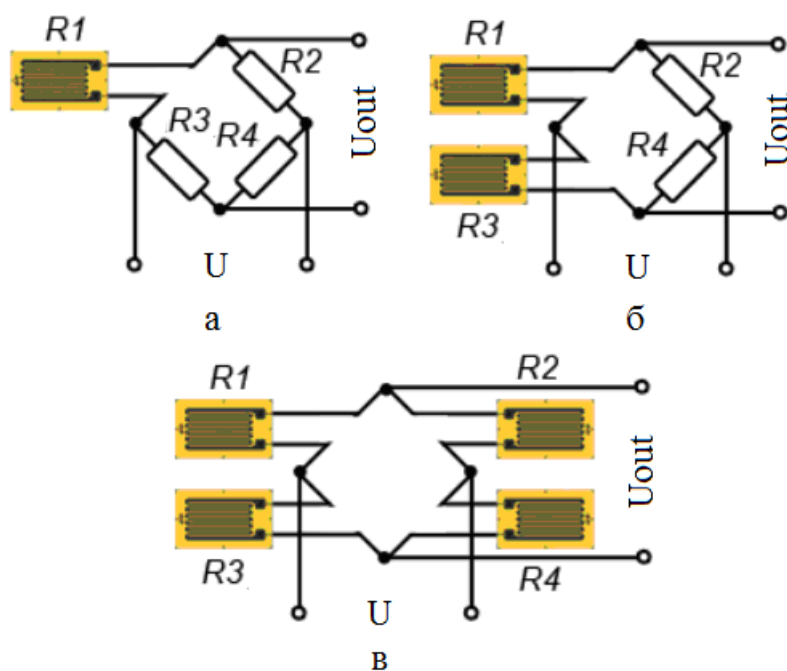


Фиг.4.4. Розетка от два тензорезистора, разположени под ъгъл 90°



Фиг.4.5. Използване на тензорезисторна розетка за определяне на механични напрежения във въртящи се валове на машини

Тензорезисторите най-често се включват в мостови измервателни схеми. Може да се включват един, два или четири работни преобразувателя в рамената на моста (фиг.4.6).

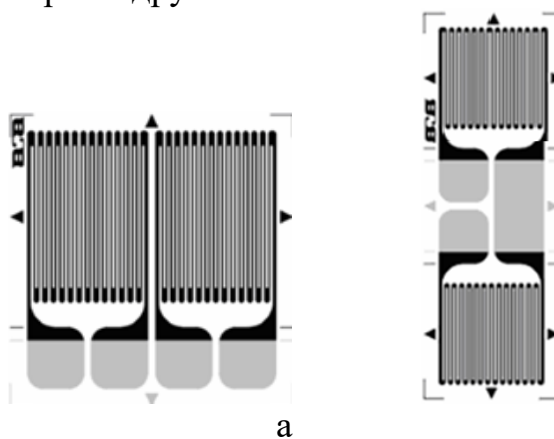


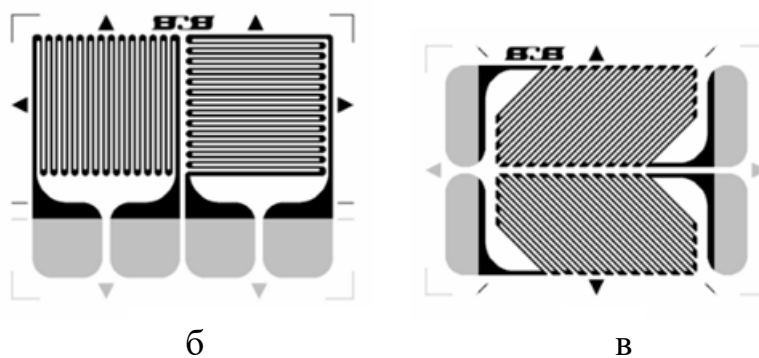
Фиг.4.6. Мостови схеми на включване на тензорезистори: а) с един тензорезистор - четвърт мост; б) полумост; в) пълен мост

Във връзка с тези възможности на включване, тензорезисторите могат да се изготвят като един, два или четири тензорезистора върху една подложка. В тези случаи те могат да са в изпълнение като единичен тензорезистор (четвърт мост), полумост или пълен мост.

В двойните тензорезистори или в полумостовото изпълнение двата тензорезистора са разположени един до друг, като могат да бъдат в няколко основни изпълнения (фиг.4.7):

- линейни паралелни;
- линейни перпендикулярни – с ориентация на решетките по X и Y;
- наклонени перпендикулярни – с наклон на решетките 45° спрямо осите X/Y и 90° един спрямо друг.

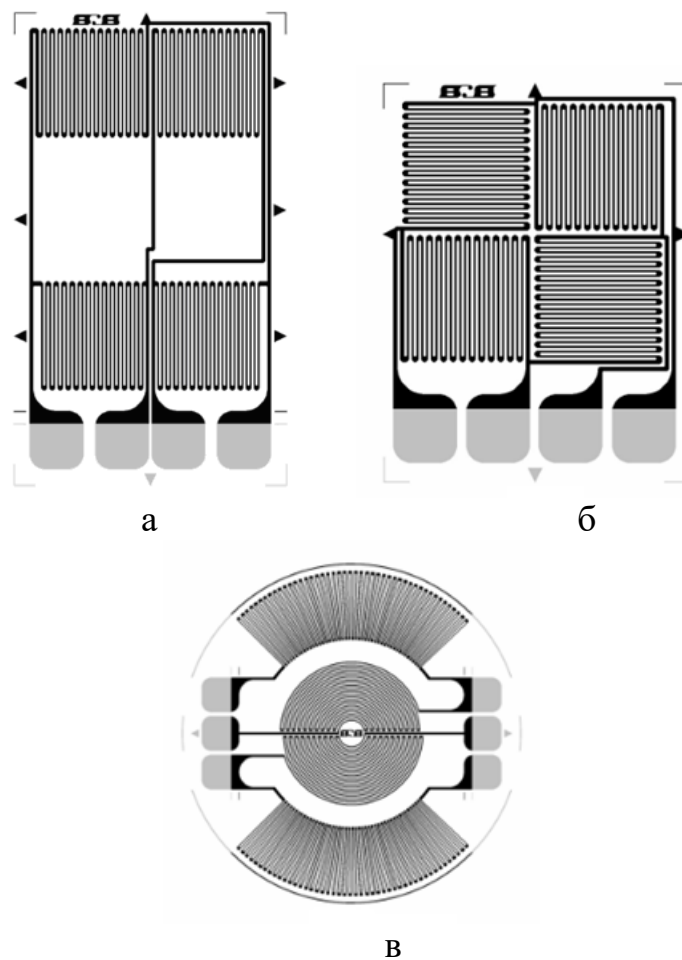




Фиг.4.7. Двойни тензорезистори и полумостови тензорезисторни розетки:
а) линейни паралелни; б) линейни перпендикулярни; в) наклонени перпендикулярни

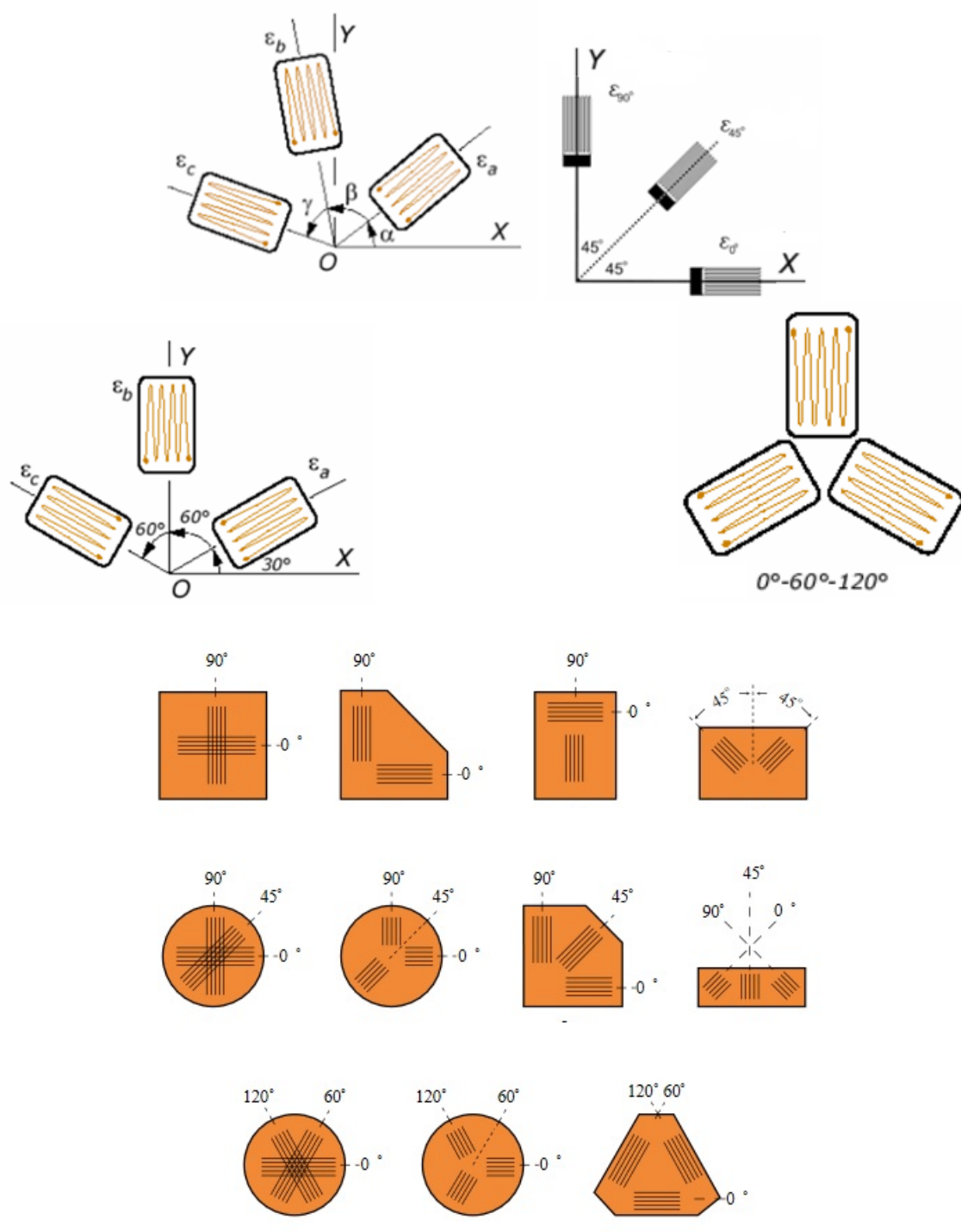
При пълномостовото изпълнение на тензорезисторите (фиг.4.8) се използват четири тензорезистора с няколко главни типа решетки:

- линейни паралелни;
- линейни перпендикулярни;
- радиално-кръгови.



Фиг.4.8. Пълномостови тензорезисторни розетки: а) линейни паралелни; б) линейни перпендикулярни; в) радиално-кръгови

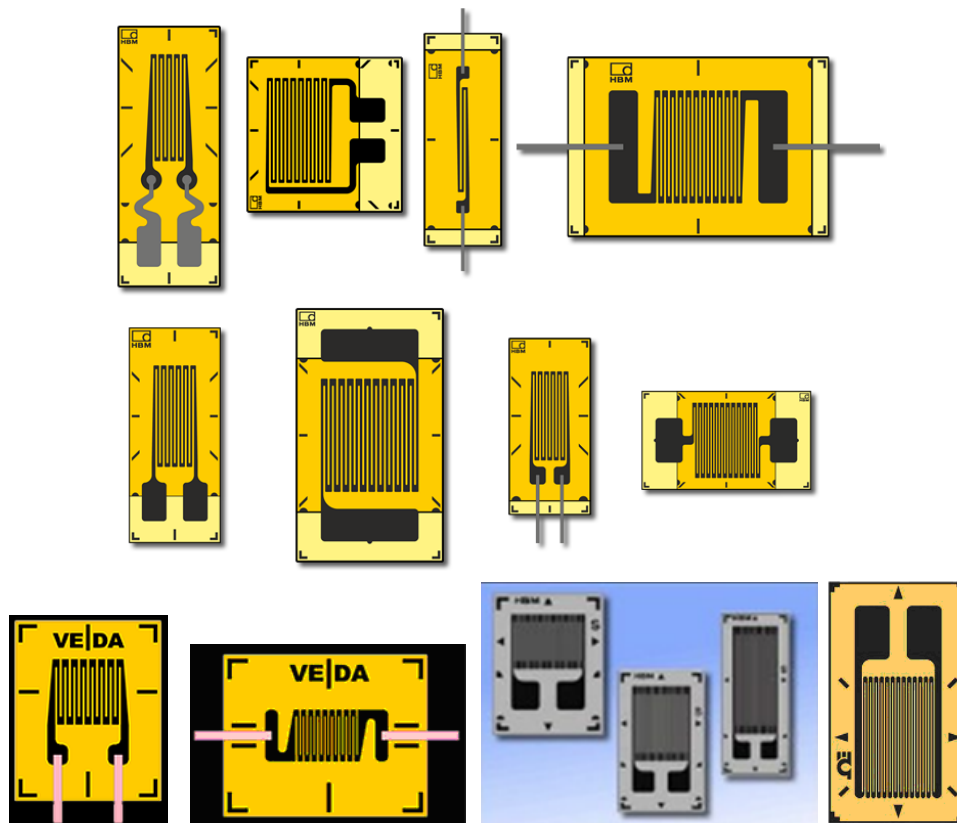
Предлагат се тензорезисторни розетки с ориентация на елементите един спрямо друг на ъгъл 45° , 60° , 90° , 120° , 135° или многослойно разположение на елементите (фиг.4.9) за измерване на компонентите на сложни механични напрежения и моменти.



Фиг.4.9. Тензорезисторни розетки с разположение на елементите под различни ъгли

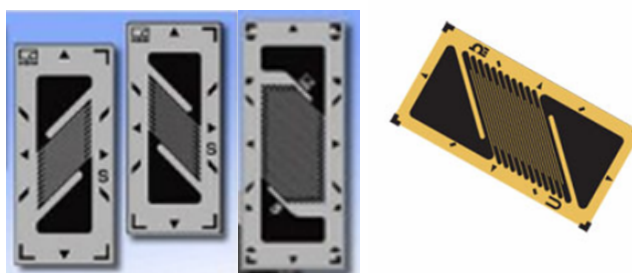
Тензорезистори и тензорезисторни розетки се предлагат от различни фирми с голямо разнообразие от видове, размери и области на приложение.

Различни линейни LY тензорезистори с възможност за измерване на механични напрежения в едно направление са показани на фиг.4.10.



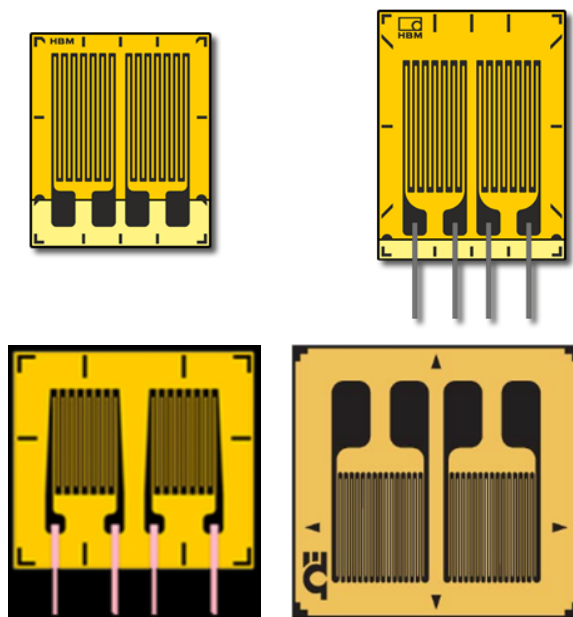
Фиг.4.10. LY линейни тензорезистори

Единични наклонени (single shear) тензорезистори S са показани на фиг.4.11.



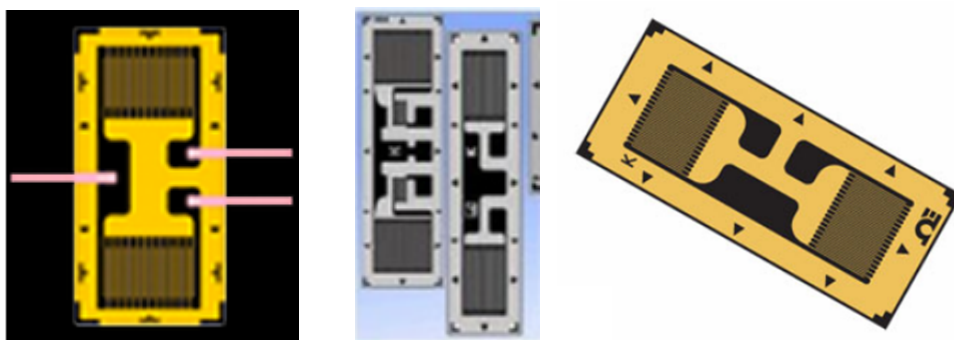
Фиг.4.11. S единични наклонени тензорезистори (single shear strain gauges)

Двойни линейни тензорезистори (DY), включващи по два линейни елемента, разположени паралелно един спрямо друг, са показани на фиг.4.12.



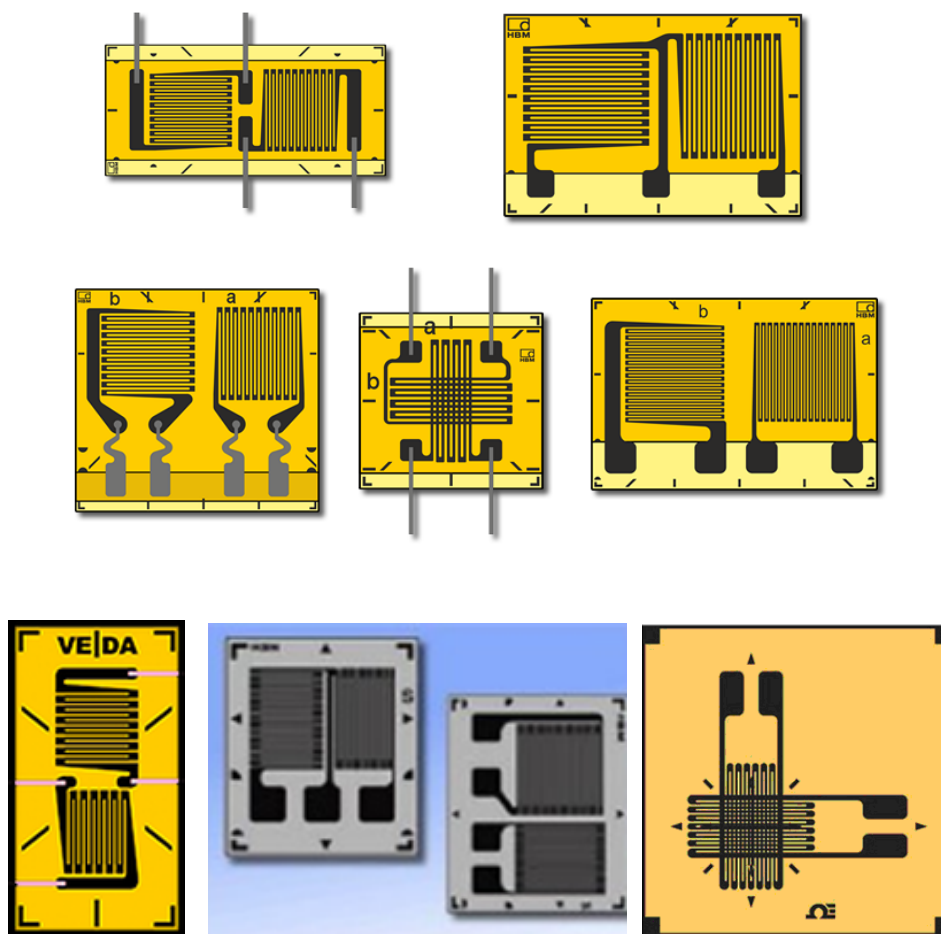
Фиг.4.12. Двойни линейни (DY) тензорезистори

Тензорезисторни розетки - полумост с по два паралелни линейни тензорезистора, са показани на фиг.4.13.



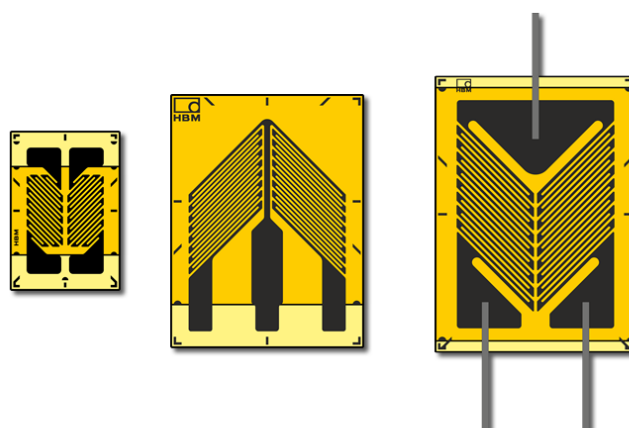
Фиг.4.13. Тензорезисторни розетки - полумост с по два паралелни линейни тензорезистора

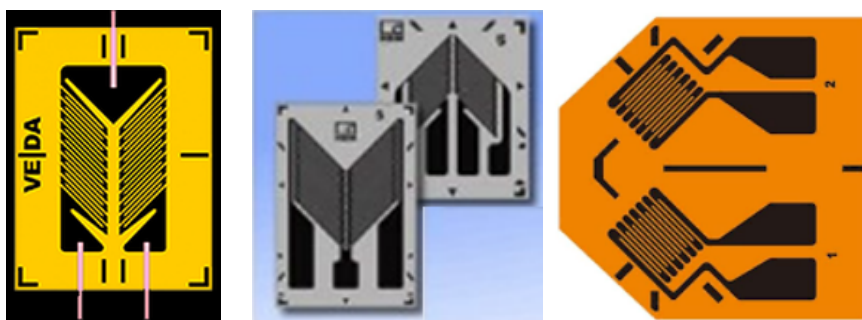
На фиг.4.14 са показани линейни перпендикулярни - XY тензорезисторни розетки (розетки тип Т) с по два измервателни елемента, разположени на ъгъл 90° един спрямо друг, отчитащи механични напрежения в направления X-Y.



Фиг.4.14. XY тензорезисторни розетки (розетки тип Т)

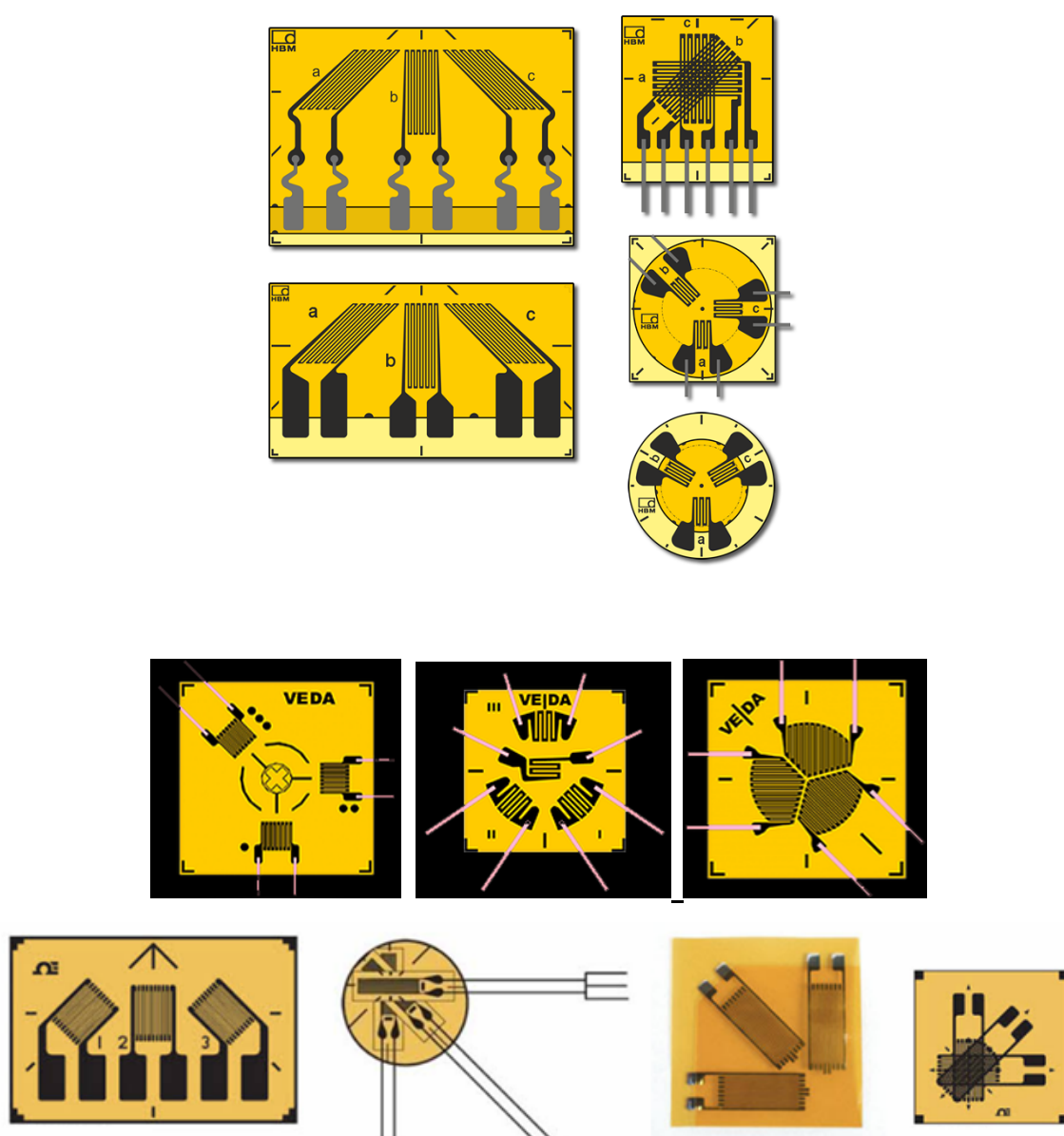
Двойни тензорезисторни розетки за измерване на механични напрежения на усукване/срязване с по два елемента под наклон 45° (double shear) спрямо осите X и Y, образуващи розетки тип V, са показани на фиг.4.15.

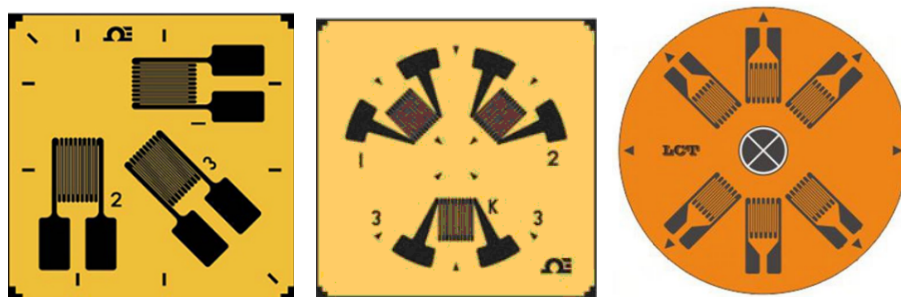




Фиг.4.15. Тензорезисторни розетки тип V с разположение на елементите под ъгъл 45°

RУ тензорезисторни розетки с три елемента с ориентация на решетките под различни ъгли ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$, $0^\circ/60^\circ/120^\circ$) са представени на фиг.4.16.

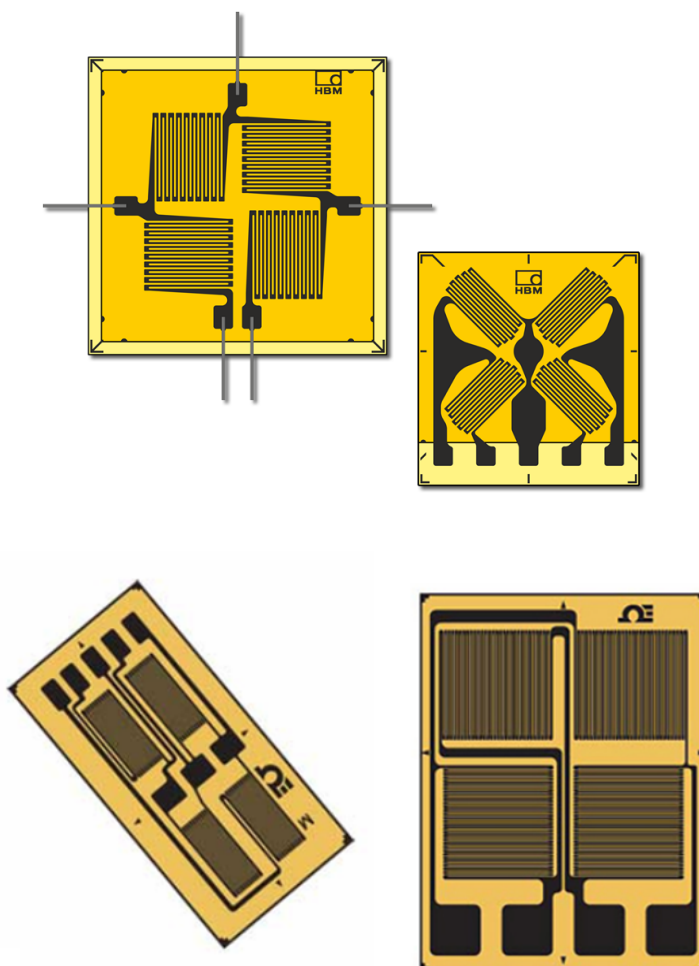


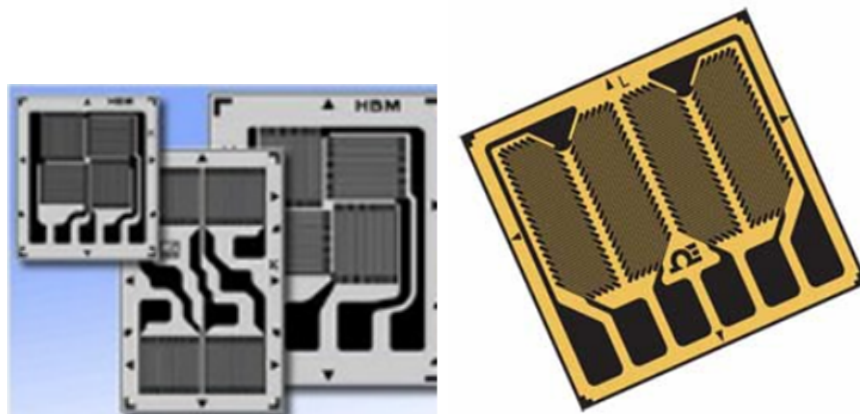


Фиг.4.16. RY тензорезисторни розетки

Тези розетки дават възможност за анализ на биаксиални механични напрежения с неизвестни главни направления.

Пълни мостови тензорезисторни розетки са представени на фиг.4.17.

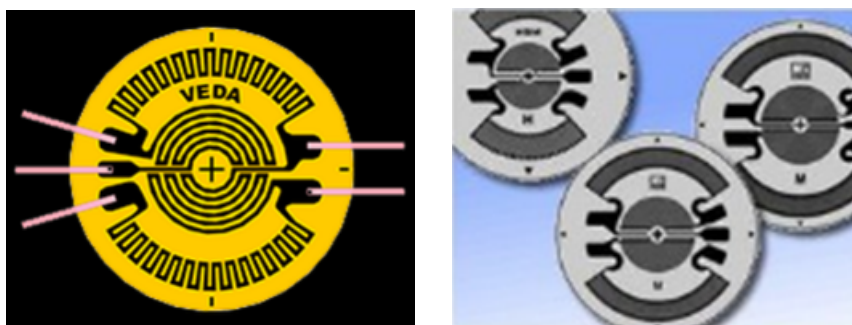




Фиг.4.17. Тензорезисторни розетки – пълен мост

Те включват 4 елемента, позволяващи измерване на механични напрежения на опън/натиск и срязване.

Тензорезисторни мембранны розетки – пълен мост, са показани на фиг.4.18.



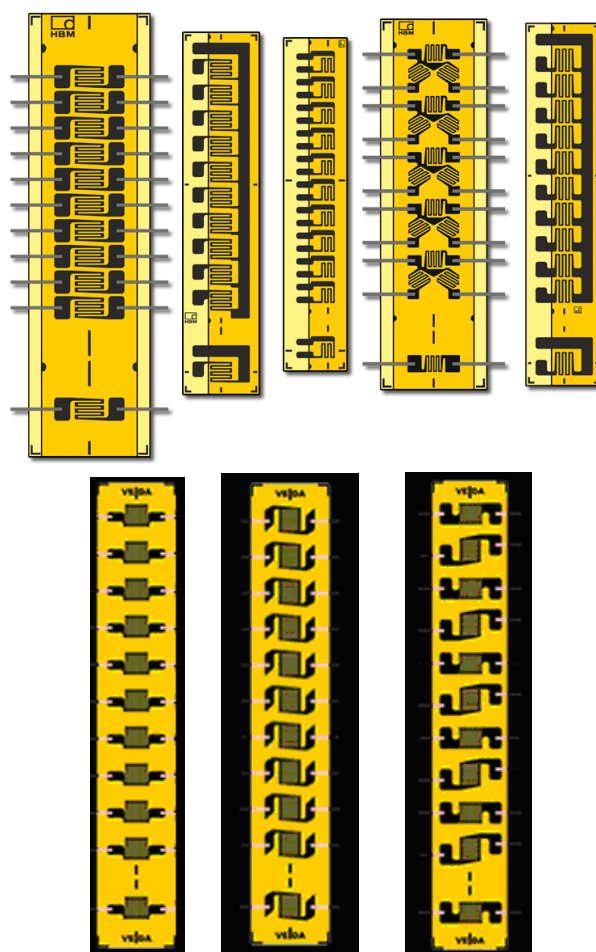
Фиг.4.18. Тензорезисторни мембранны розетки – пълен мост

Тензорезисторна линейно-диафрагмална розетка – пълен мост е представена на фиг.4.19.



Фиг.4.19. Тензорезисторна линейно-диафрагмална розетка – пълен мост

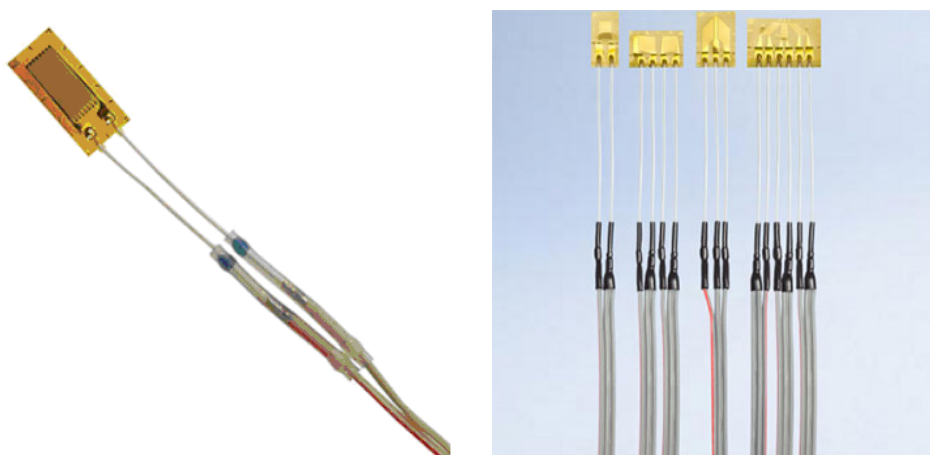
Предлагат се КУ вериги от тензорезистори за определяне на градиенти на механични напрежения (фиг.4.20).



Фиг.4.20. КУ вериги от тензорезистори

Състоят се от 10 до 15 малки тензорезисторни елементи, които се разполагат върху обща подложка и на еднакво разстояние помежду си, и един компенсиращ тензорезисторен елемент.

Фирмите предлагат също предварително опроводени тензорезистори, с което се улеснява тяхното практическо приложение (фиг.4.21).



Фиг.4.21. Предварително опроводени тензорезистори

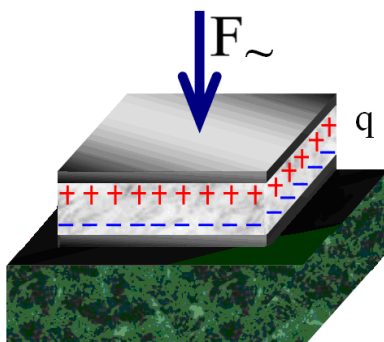
4.2. Пиезоелектрически преобразуватели

Действието на тези преобразуватели се основава на явлението пиезоефект, който се проявява в някои диелектрични материали. Ако пластинка, изрязана от кристала на такъв материал, се натовари механично, тя се поляризира и на повърхността ѝ възникват електрически заряди, пропорционално на приложената сила. Поляризацията и зарядите изчезват при премахване на натоварването. Това явление се нарича прав пиезоелектричен ефект.

Когато такава пластинка се постави в електрическо поле, в нея възниква механично напрежение или се изменят геометричните ѝ размери. Това явление се нарича обратен пиезоефект.

Типичен представител и най-използван пиезоелектрик е кварцът с ненарушена кристална решетка. Приложение като пиезоелектрик намира и сегнетовата сол, а от керамичните материали – изкуствено поляризираният бариев титанат, оловно-циркониевият титанат и др.

Пиезоелектрическите преобразуватели са преобразуватели от генераторен тип. При въздействието на външна сила се генерират електрически заряди. На фиг.4.22 е представена правоъгълна пиезоелектрическа пластина, върху която въздейства динамична сила F . При прилагане на тази сила се създават механични напрежения в пиезопреобразувателя и върху стените се появява електрически заряд q .



Фиг.4.22. Пиезоелектрически преобразувател

Пиезопреобразувателите се използват за измерване на динамични (изменящи се във времето) сили, като обикновено минималните честоти, при които те работят, са (0,5 ... 1) Hz.

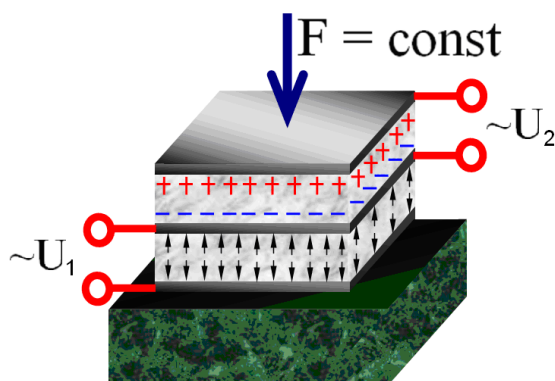
Тъй като за действаща сила е в сила зависимостта

$$F = m a, \quad (4.5)$$

където m е масата, а a - ускорението, то пиезопреобразувателите могат да се прилагат за измерване освен на динамични сили (до 10^4 N), и на ускорения (до 1000 g) в обхват от 0,5 до 100 Hz. Ако се използват допълнително един или два интегриращи елемента, то могат да се измерят и други параметри на движение - скорости или амплитуди (например

параметри на вибрации).

Когато към пиезопреобразувателя се приложи статична сила, то възникналият заряд и напрежение ще се запазят същите само, ако измервателната верига има безкрайно голямо съпротивление, което е практически невъзможно. Затова за измерване на статични сили се използват така наречените пиезотрансформатори (фиг.4.23).



Фиг.4.23. Пиезотрансформатор

Два пиезопреобразувателя се поставят в стълб един върху друг. В случая към долния се прилага променливо напрежение U_1 . В съответствие с обратния пиезоефект долният кристал изменя геометричните си размери в такт с честотата, т.е. поражда се колебания и той се превръща в излъчвател. При това горният преобразувател, който е натоварен със статична сила, възприема тези колебания и в съответствие с правия пиезоефект по неговите стени се получават електрически заряди. Напрежението U_2 между изходните електроди ще бъде пропорционално на приложената сила. За тази сила се съди или по стойността на U_2 или по фазовата разлика между U_1 и U_2 .

На практика най-често пиезотрансформаторите се изготвят като един пиезопреобразувател с три електрода.

Обратният пиезоефект най-често се използва за изготвяне на ултразвукови излъчватели на трептения до 200 kHz.

4.3. Магнитоеластични преобразуватели

Магнитоеластичните преобразуватели се основават на магнитоеластичния ефект, който се състои в изменение на магнитната проницаемост на феромагнитните материали при възникване в тях на механични напрежения, предизвикани от външни сили.

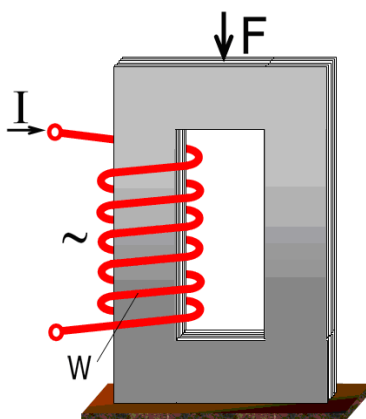
Съществува и обратният ефект, наречен магнитострикционен, който се състои в промяна на геометричните размери на феромагнитните материали при внасянето им в магнитно поле. Ако при това феромагнитното тяло

увеличава размерите си, то е налице положителна магнитострикция $+\lambda$, ако намалява - отрицателна магнитострикция $-\lambda$. Положителна магнитострикция имат желязото и повечето сплави на негова основа, отрицателна – никалът и др.

С помощта на магнитоелестичния ефект могат да се измерват сили, механични напрежения и моменти. На основата на магнитострикционния ефект се изготвят излъчватели на ултразвукови вълни.

4.3.1. Магнитоеластични преобразуватели от индуктивен тип

Магнитоеластичен преобразувател от индуктивен тип е показан на фиг.4.24.



Фиг.4.24. Магнитоеластичен преобразувател от индуктивен тип

При въздействие на сила F върху магнитопровода, в него възникват механични деформации и механични напрежения σ , което води до промяна на магнитната проницаемост μ , предизвикващо промяна на магнитното съпротивление R_μ . При промяна на R_μ се променя индуктивността L на бобината, което води до изменение на импеданса z

$$R_\mu = \frac{l}{\mu s}; \quad L = \frac{W^2}{R_\mu}; \quad z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (4.6)$$

Тъй като $R \ll \omega L$, то $z \approx \omega L = \omega W^2 \mu \frac{s}{l}$, където W е броят на навивките на бобината, l е дължината на магнитопровода, s – площта на напречното му сечение.

Следователно

$$z = f(\mu). \quad (4.7)$$

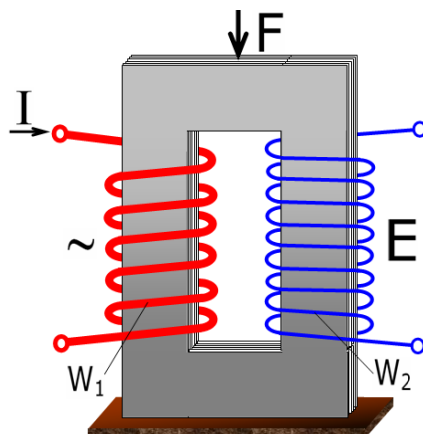
При материали с положителна магнитоострикция механичните напрежения на натиск предизвикват отрицателна промяна (намаляване) на магнитната проницаемост. За преобразувателя от фиг.4.23 при положителна магнитострикция ще бъде изпълнено

$$z = z_n - \Delta z = \omega W^2 (\mu_n - \Delta\mu) \frac{S}{l}, \quad (4.8)$$

където z_n е началният импеданс на бобината при $F=0$.

4.3.2. Магнитоеластични преобразуватели от взаимноиндуктивен тип

Всеки магнитоеластичен преобразувател от индуктивен (дроселен) тип може да се преобразува в такъв от взаимноиндуктивен (трансформаторен) тип при добавяне на измервателна бобина върху магнитопровода (фиг.4.25).



Фиг.4.25. Магнитоеластичен преобразувател от взаимноиндуктивен тип

При този тип преобразуватели

$$M = \frac{W_1 W_2}{R_\mu}. \quad (4.9)$$

$$E = \omega W_1 W_2 I \mu \frac{S}{l}, \quad (4.10)$$

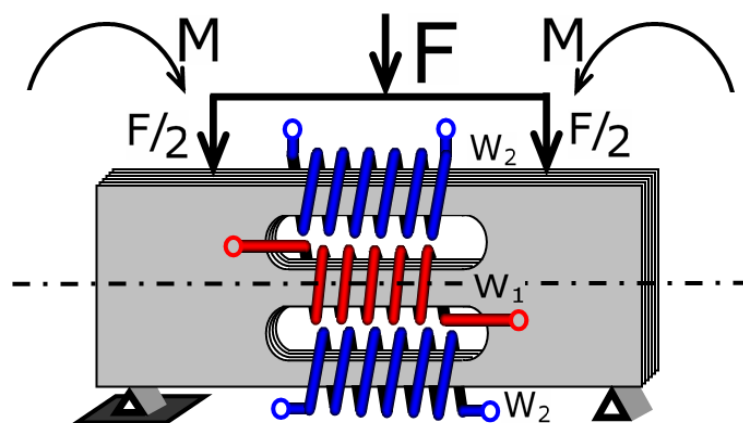
където I е намагнитващият ток.

За взаимноиндуктивния магнитоеластичен преобразувател от фиг.4.24 при положителна магнитострикция ще бъде изпълнено

$$E = E_n - \Delta E = \omega M I = \omega W_1 W_2 I (\mu_n - \Delta\mu) \frac{S}{l}. \quad (4.11)$$

Разглежданите преобразуватели могат да бъдат от единичен и диференциален тип. На фиг.4.26 е представен диференциален магнитоеластичен трансформаторен преобразувател с огъване на магнитопровода.

Представява гредата от феромагнитен материал, поставена върху две опори. Върху средната колона е разположена намагнитващата намотка W_1 , а върху другите две са разположени две секции W_2' и W_2'' на измервателната намотка, свързани противоположно (несъгласувано).



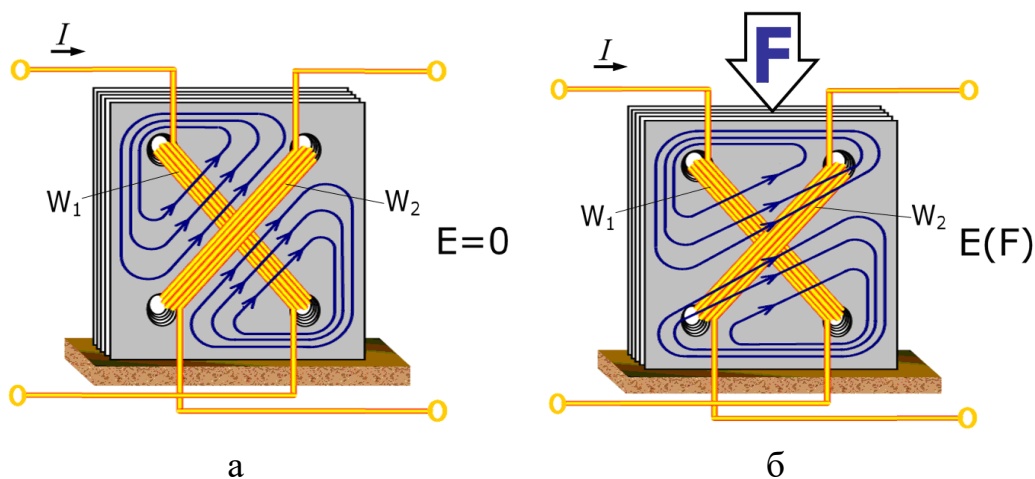
Фиг.4.26. Диференциален магнитоеластичен трансформаторен преобразувател с огъване на магнитопровода

4.3.3. Магнитоанизотропни преобразуватели

Към магнитоеластичните преобразуватели се отнасят и така наречените магнитоанизотропни преобразуватели. Основават се на магнитната анизотропия на феромагнитните материали при възникване в тях на механични напрежения, създадени от външни сили.

Магнитната анизотропия е разлика в магнитната проницаемост на материала в различните геометрични направления.

Магнитоанизотропен преобразувател е представен на фиг.4.27. Той е от трансформаторен тип.



Фиг.4.27. Магнитоанизотропен преобразувател

Магнитопроводът представлява блок с форма на паралелепипед или куб и е изготвен от листов материал. В него са пробити 4 отвора, които са разположени във върховете на квадрат. Намагнитващата W_1 и измервателната W_2 намотки са разположени под прав ъгъл една спрямо друга, което изключва индуктивна връзка помежду им.

Когато измервателният преобразувател не е натоварен ($F=0$ - фиг.4.27а), магнитна анизотропия в материала няма. При това магнитният поток, създаден от намагнитващата намотка, е по линии, които не пресичат измервателната намотка W_2 и в нея не се индуктира е.д.н.

При прилагане на сила F (фиг.4.27б) в магнитопровода се създават механични напрежения – в случая това са напрежения на натиск. В материала възниква магнитна анизотропия, като в направлението, успоредно на приложената сила, при положителна магнитострикция, магнитната проницаемост намалява, а в перпендикулярно на силата направление – се увеличава. Това води до изкривяване на линиите на магнитното поле. Част от линиите на това поле ще обхванат измервателната намотка и в нея ще се индуктира е.д.н.

$$E = f(F), \quad (4.15)$$

което ще е пропорционално на приложената сила.

4.4. Тактилни сензори

Тактилните сензори са предназначени за определяне на непосредственото съприкосновение с външни обекти, т.е. те са аналогични на органите на осезание на живите организми. В робототехниката се използват за очувствяване на работните органи на индустриални роботи, манипулатори и корпуси на мобилни роботи. Чрез тях се регистрира наличието на съприкосновение на работния инструмент на работа с обекта, осигурява се определяне на посоката и скоростта на относителното приплъзване на обекта по повърхността на захвата, а също - измерване на силата на притискане. Тактилните сензори се разполагат на вътрешните и външни повърхности на захвата. По характера на измерваните параметри на взаимодействие на захвата с обекта, тактилните сензори могат да се разделят на три групи: сензори за допир, сензори за контактната сила и сензори за приплъзване. Тактилните сензорни системи се използват също за разпознаване на формата на обекта чрез опипване и следене за границите на обекта.

Сензорите за допир и контактна сила са предназначени за измерване на една и съща физическа величина – действащата сила. Различието е в това, че първите имат праг на сработване и по същество са релейни сензори за сила, настроени на зададена стойност на измервания параметър. Сензорите за приплъзване в захвата са необходими за определяне на нивото, когато обектът е надеждно захванат и в същото време силата на стискане е недостатъчна за разрушаването му. Тактилните сензори намират приложение още в биомедицината, в стоматологията и др.

Тактилните сензори могат да бъдат единични и матрични (заемащи определена повърхност), аналогови и дискретни. В тях като тензочувствителни елементи се използват електропроводящи полимери,

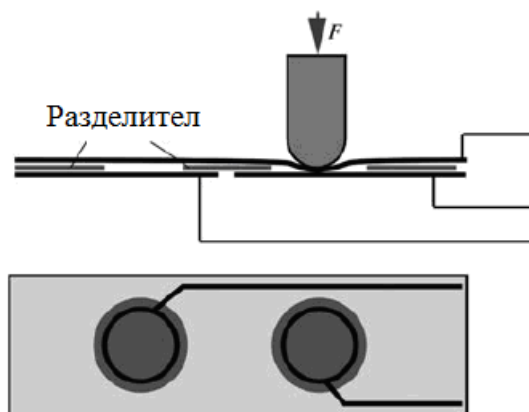
микропревключватели и др. Използват се устройства от типа „изкуствена кожа“ на базата на еластомери, слоеве от поливинилденфлуорид (PVDF) и композитни материали с влакна от графит. В матричните тактилни сензори се вгражда микроконтролер, чрез който се извършва обработка на информацията от сензорите и се формира тактилният образ на обекта в двоичен код.

Тактилните сензори трябва да имат висока надеждност, здравина, изнosoустойчивост, прахо- и влагозащитеност, да са високоустойчиви към механични и температурни претоварвания.

Съществуват следните типове тактилни сензори:

- **Контактни тактилни сензори**

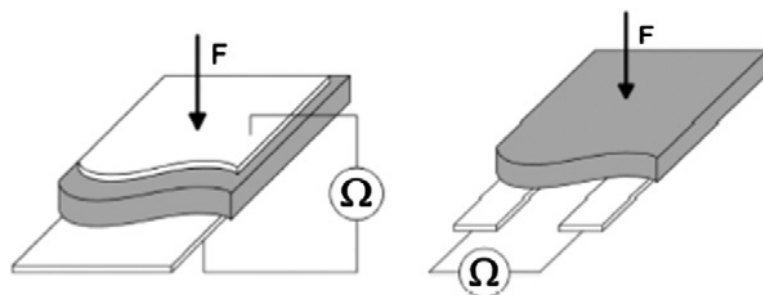
На фиг.4.28 е показан тактилен сензор, осигуряващ функциите включено/изключено. Той се състои от два листа метално фолио и изолационен разделител. В разделителя са направени кръгли отвори. Когато към горното метално фолио се приложи усилие над отвора в разделителя, то се огъва и се осъществява контакт с долното фолио. При това се изработва електрически сигнал, указващ за приложената сила. На базата на този тип сензор може да се изготви матрица от сензори.



Фиг.4.28. Тактилен чувствителен елемент от мембранен тип

- **Резистивни сензори**

Основният принцип на работа на този тип сензор е измерването на съпротивлението на проводим еластомер между две точки. По-голямата част от сензорите използват еластомер, който се състои от каучук с добавен графит. С прилагане на сила, в резултат на деформацията се променя плътността на проводимите частици, а оттам - и съпротивлението (фиг.4.29).



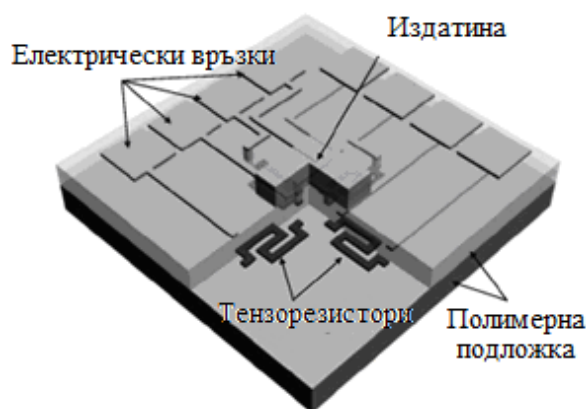
Фиг.4.29. Тактилен сензор от резистивен тип

Този тип тактилни сензори, въпреки несложната си конструкция, имат и редица недостатъци. След продължителна употреба еластомерът ще остане трайно деформиран. Това изисква замяна на сензора след определен период на експлоатация. Освен това той се характеризира със значителен хистерезис и невисоко бързодействие. Дори и с тези недостатъци, повечето от промишлените аналогови тактилни сензори са базирани на този принцип.

Като цяло резистивните сензори се характеризират с добра чувствителност, лесно свързване към захващащата система на робота и включване към несложна електронна схема. Обикновено се използва неуравновесен мост на Уитстън за преобразуване на промяната на съпротивлението в напрежение на изхода.

- **Резистивни сензори с тензорезистори**

Тактилният сензор използва като чувствителни елементи тензорезистори. На фиг.4.30 е показан схематично видът на този сензор.

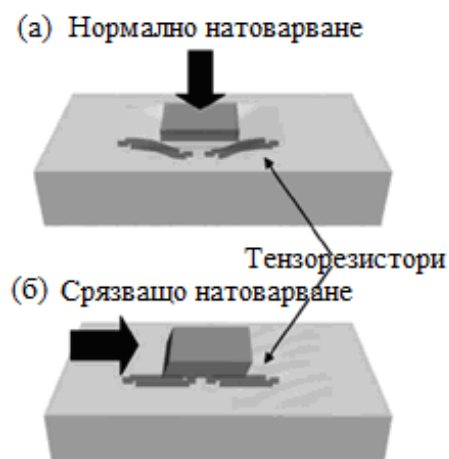


Фиг.4.30. Схематичен вид на тактилен сензор с тензорезисторни чувствителни елементи

Тензорезисторите са вградени в тяло от полимерен материал. Те са формирани на базата на тънки метални слоеве. Както полимерният материал, така и металните слоеве позволяват сензорът да бъде гъвкав. На

горната повърхност на сензора е оформен елемент във вид на издатина (bump structure) за улесняване на разпределението на натоварването. Когато се прилага външна сила върху сензора, полимерното тяло и тънките метални слоеве се деформират, което предизвиква механично напрежение и промяна на електрическото съпротивление на тензорезисторите.

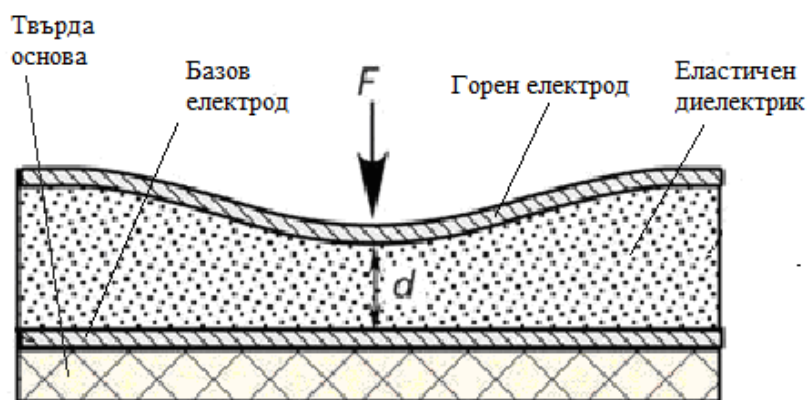
Тензорезисторите са вградени в центъра на полимерното тяло. Когато върху повърхността на сензора се приложи нормално натоварване, основата се деформира. Тази деформация предизвиква равномерно натоварване на тензорезисторите (фиг.4.31а). Когато се върху сензора се прилага странично (срязващо) натоварване (фиг.4.31б), едният тензорезистор ще бъдат подложен на опън, докато другият - на натиск. Получената разлика в електрическите съпротивления на тензорезисторите позволява да се определи срязващото натоварване.



Фиг.4.31. Нормално и срязващо натоварване върху тактилният сензор

- **Капацитивен тактилен сензор**

Капацитивните сензори се състоят от два метални електрода под формата на пластини, разположени на определено разстояние една от друга. Проводящите пластини се разделят от диелектрична среда на базата на еластомер. При прилагане на усилие се променя разстоянието между електродите на кондензатора и оттам - и капацитета му. На фиг.4.32 е показана структурата на капацитивен тактилен сензор.

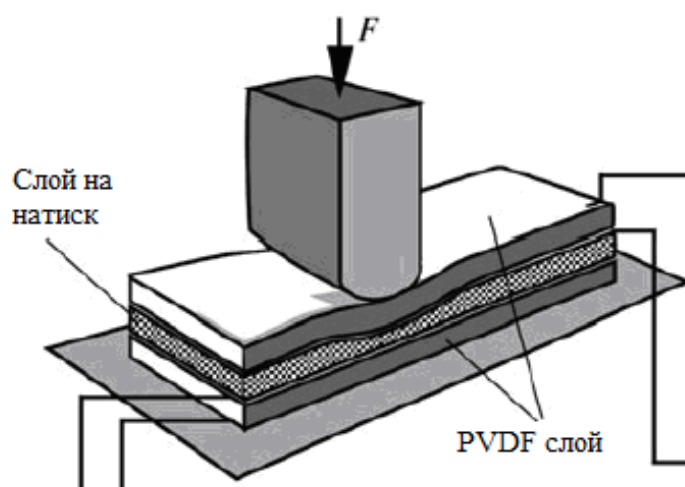


Фиг.4.32. Капацитивен тактилен сензор

Капацитивните сензори могат да бъдат направени с много малки размери, което позволява на тяхна база да се реализират сензорни тактилни матрици. Те могат да бъдат реализирани и чрез MEMS технология.

- **Пиезоелектрични тактилни сензори**

Полимерните материали, които притежават пиезоелектрични свойства, са подходящи за използване като чувствителни елементи при тактилните сензори. Добри тактилни сензори се разработват чрез използване на пиезоелектрични слоеве на базата на поливинилиденфлуорид (PVDF). Тъй като този материал може лесно да се получава във вид на тънки слоеве с различна дебелина и има добри механични свойства, той може да се използва като материал за изготвяне на изкуствена кожа. За да притежава пиезоелектрични свойства PVDF слой се нагрява до температура 170°C и се поляризира чрез прилагане на силно електрическо поле. На фиг.4.33 е представена структурата на пиезоелектричен тактилен сензор на базата на PVDF слоеве.

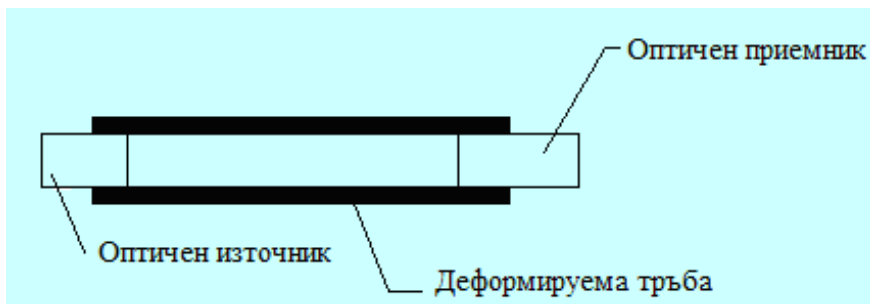


Фиг.4.33. Пиезоелектричен тактилен сензор

Ламинирани са три слоя – горен и долен слой от PVDF и междинен слой, който е предназначен за акустична връзка между двата слоя. Твърдостта на междинния слой определя чувствителността и работния диапазон на сензора. Получената структура представлява пиезоелектричен трансформатор. Долният пиезоелектричен слой е свързан към генератор, чийто сигнал предизвиква механични трептения в слоя. Тези трептения се предават към горния слой PVDF чрез междинния слой. В резултат на механичните трептения горният слой PVDF генерира електрическо напрежение. Когато силата F действа върху горния слой, се променя амплитудата и фазата на изходното електрическо напрежение от него. Тези промени се обработват от електронната схема, към която е свързан горният слой. Предимствата на този тактилен сензор са в неговата несложна конструкция и в способността за разпознаване на статични сили.

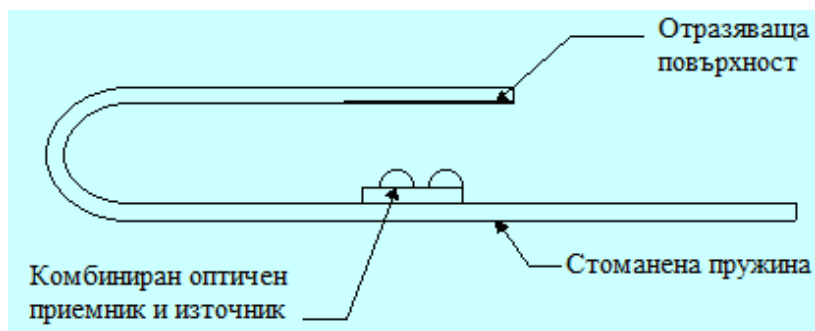
- **Оптични тактилни сензори**

Бързото развитие на оптичните технологии предопределя разработването на широк спектър от тактилни сензори. Предимствата на оптичните сензори са свързани с това, че те са устойчиви на електромагнитни смущения, притежават малко тегло и обем. Тактилните оптични сензори се разработват с помощта на редица оптични технологии. Много често се използва модулиране на интензивността на светлината (фиг.4.34). Тези сензори се характеризират с висока чувствителност. Те се реализират с помощта на деформируема тръбичка.



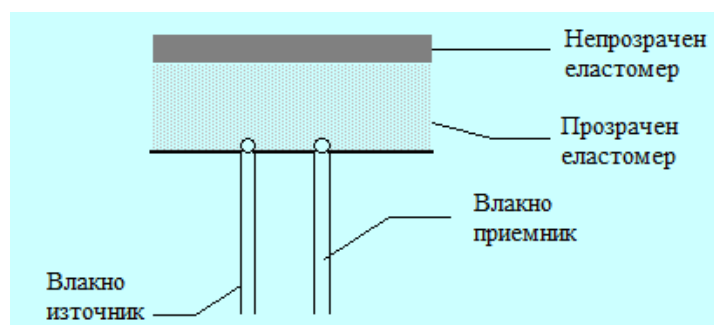
Фиг.4.34. Оптичен тактилен сензор с модулиране на светлината

Сензорът, представен на фиг.4.35, работи чрез отразяване на светлината. Разстоянието между отражателя и равнината на източника и детектора е променлива. Интензивността на получената при отражение светлина е функция на разстоянието, а оттук - и на приложената сила. Сензорът е изработен от пружинна стомана и има компактен дизайн.



Фиг.4.35. Оптичен тактилен сензор с отразяване на светлината

Рефлекторните сензори могат да бъдат конструирани с двойки оптични влакна източник-приемник, вградени в твърда еластомерна структура. Както е показано на фиг.4.36, над влакното е разположен слой от прозрачен еластомер, покрит с отразяващ силиконов каучуков слой. Количеството светлина, отразено в приемника, се определя от приложената сила, която променя дебелината на прозрачния еластомер. Чрез използването на матрица от двойки предавател-приемник може да се определи тактилното изображение на обекта.

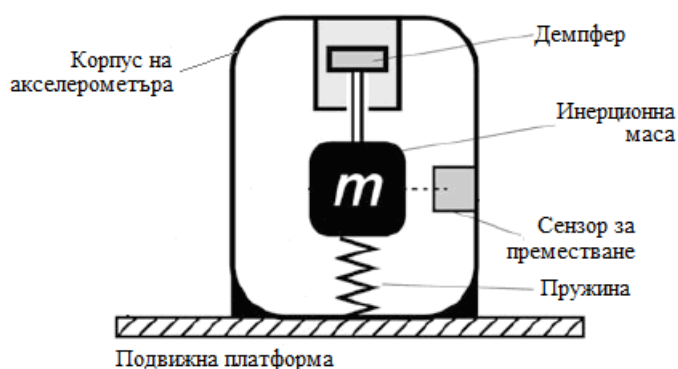


Фиг.4.36. Рефлекторен оптичен тактилен сензор

ГЛАВА 5. ИНЕРЦИАЛНИ СЕНЗОРИ

5.1. Акселерометри

Акселерометърът е сензор, който измерва ускорението на обекти. Той може да измерва ускорението по една, две или три оси. Едноосовият акселерометър е устройство с една степен на свобода, което има специален инерционен елемент с маса m , движението на който изостава от движението на корпуса, еластична поддържаща система (пружина) и демпфериращо устройство. Корпусът на акселерометъра е закрепен към подвижна платформа (фиг.5.1).



Фиг.5.1. Схематично представяне на механичен акселерометър

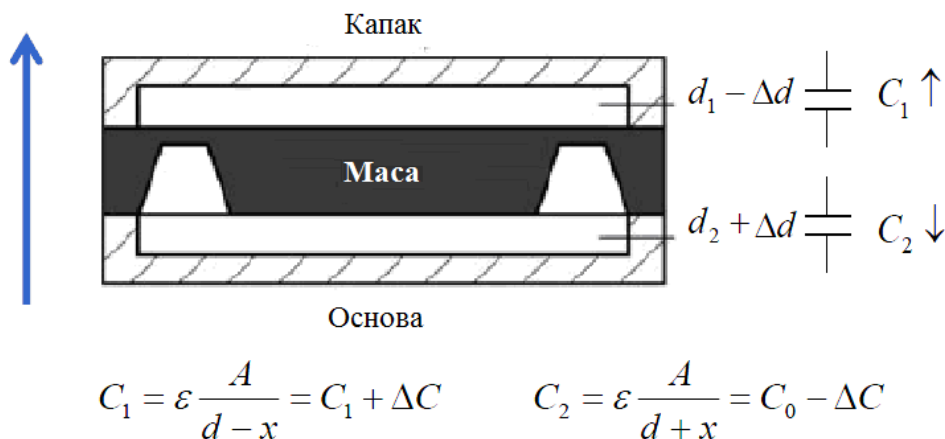
Инерционната маса m се поддържа от свиваема пружина, която позволява на масата да се премества нагоре и надолу. Масата е закрепена към два допълнителни компонента: демпфер и сензор за преместване. Основното предназначение на акселерометъра е да детектира преместването на инерционната маса относно корпуса и да преобразува това преместване в електрически сигнал. За това служи сензорът за преместване, който е част от акселерометъра.

В зависимост от начина, по който се измерва преместването на инерционната маса, акселерометрите се разделят на капацитивни, пиезорезистивни, пиезоелектрични, термични и др.

5.1.1. Капацитивни акселерометри

Сензорът се състои от две пластини – стационарна, която е свързана с корпуса, и свободно преместваща се вътре в корпуса, към която е свързана инерционната маса. Тези пластини формират кондензатор, чийто капацитет зависи от разстоянието между тях, а следователно - и от ускорението на движението, което изпитва сензорът. Максималното преместване на пластините при тези сензори не превишава $20\text{ }\mu\text{m}$. В тези сензори е необходимо да се компенсира дрейфът на различни параметри, а също - да се потискат възможните шумове. Затова тези акселерометрите

имат диференциална структура, като в структурата им се формира допълнителен кондензатор, капацитетът на който трябва да бъде близък до капацитета на основния кондензатор. На фиг.5.2 е показано напречното сечение на капацитивен диференциален акселерометър, в който инерционната маса е разположена между капака и основата.

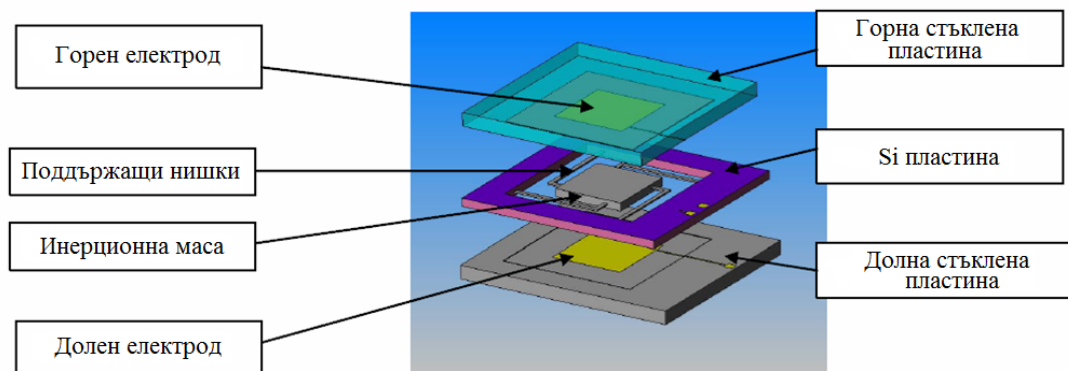


Фиг.5.2. Капацитивен диференциален акселерометър

Капакът и основата са разделени от инерционната маса на разстояние d_1 и d_2 . При движението на масата в посока на капака разстоянието d_1 се намалява с Δd , а разстоянието d_2 се увеличава със същата стойност. Стойността Δd е пропорционална на механичната сила, действаща на инерционната маса.

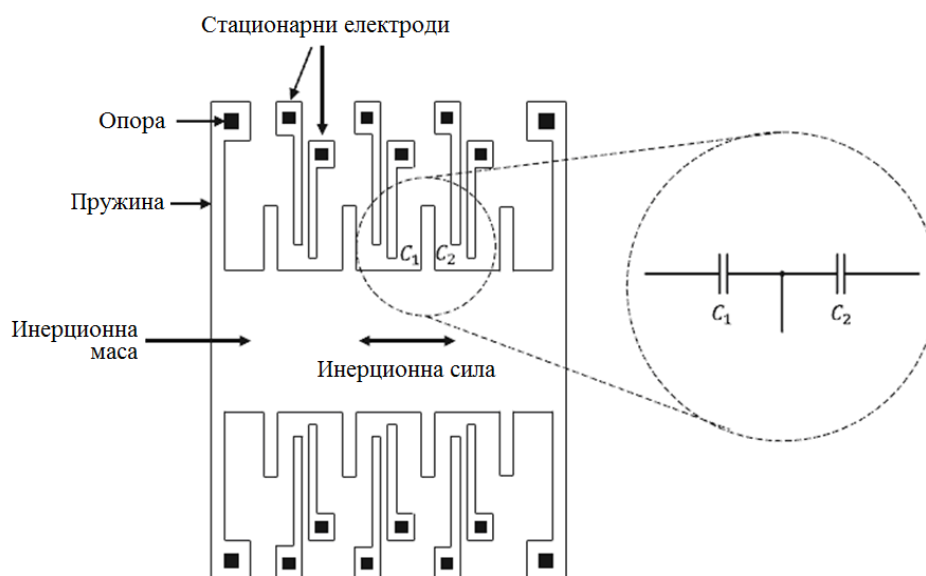
На фиг.5.3 е показана по-подробно структурата на капацитивен акселерометър, реализиран на базата на технологията на микроелектромеханичните системи – MEMS (Micro ElectroMechanical Systems - MEMS). Чрез тази технология върху един силициев чип се формират механичните компоненти на сензора, интегрирани с електронната схема за обработка на информацията от него. Акселерометри, произведените чрез MEMS технология, са по-малки, леки, надеждни и евтини. Предлагат се:

- аналогови акселерометри, при които изходният сигнал е постоянно напрежение;
- акселерометри с изходен сигнал правоъгълни импулси с ШИМ;
- цифрови акселерометри с интерфейси SPI или I²C.



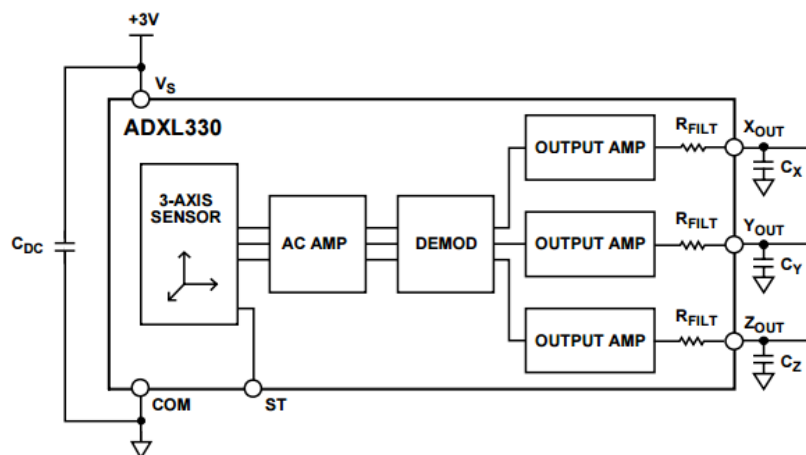
Фиг.5.3. Структура на кондензаторен акселерометър, реализиран по методите на микротехнологията

На фиг.5.4 схематично е показана друга реализация на кондензаторните акселерометри чрез MEMS технология. Тази структура е едноосен акселерометър, чиято ос е успоредна на основата на корпуса му. За създаване на двуосни акселерометри в интегралната схема се монтират перпендикулярно една върху друга две пластинки, всяка със своя измервателна схема, чиито оси отново са успоредни на основата на корпуса. При триосните акселерометри се формира трета пластинка, перпендикулярна на основата на корпуса.



Фиг.5.4. Реализация на кондензаторни акселерометри чрез MEMS технология

На фиг.5.5 е показана функционалната блокова схема на триосния акселерометър ADXL330, предлаган от фирмата Analog Devices.



Фиг.5.5. Функционална блокова схема на триосен акселерометър ADXL330

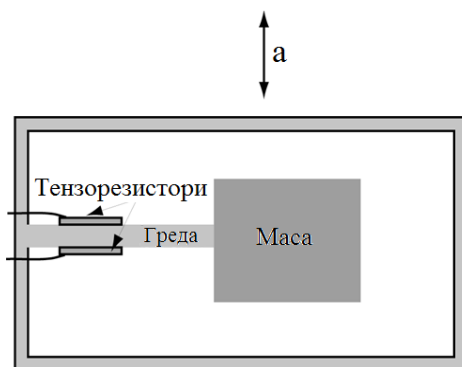
Напреженията от трите пластинки се усилват от блока AC AMP. След това чрез фазочувствително демодулиране се определя големината и посоката на ускорението. Изходните резистори, заедно с външните кондензатори C_X , C_Y и C_Z образуват нискочестотни филтри за определяне на желаната максимална честота за всяка от осите. Ширината на честотните ленти може да бъде избрана така, че да съответства на приложението, с диапазон от 0,5 Hz до 1600 Hz за оси X и Y и от 0,5 Hz до 550 Hz - за ос Z.

Акселерометърът може да измерва статичното ускорение на гравитацията в приложенията за наблюдение на наклона, както и динамичното ускорение в резултат на движение, удар или вибрация.

MEMS акселерометри се предлагат от фирмите Analog Devices, Freescale Semiconductor, Texas Instruments, ST Microelectronics, Epson и др.

5.1.2. Пиезорезистивни акселерометри

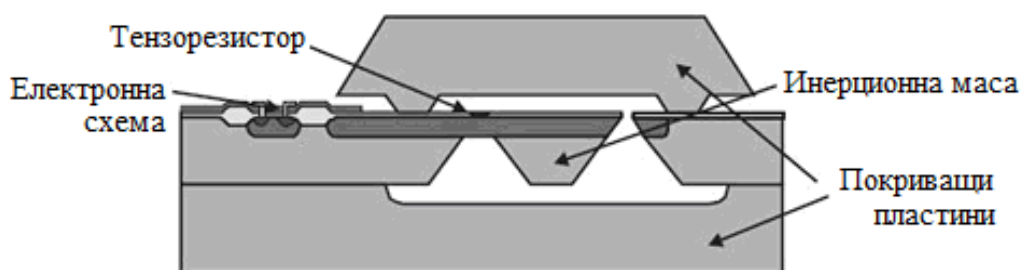
Чувствителният елемент на такива акселерометри е тензорезистор, измерващ деформацията на пружината, поддържаща инерционната маса (фиг.5.6).



Фиг.5.6. Пиезорезистивен акселерометър

Тази деформация е пропорционална на големината и скоростта на преместването на инерционната маса и следователно – на ускорението. Такива сензори могат да измерват ускорения в широк честотен диапазон – от 0 до 13 kHz.

Акселерометрите, реализирани от дискретни компоненти, притежават индивидуални температурни характеристики и имат висока температурна зависимост на изходното напрежение, което изисква подбор на параметрите на съставните елементи на всеки сензор. Този проблем се решава при интегрално изготвяне на такива акселерометри чрез използване на MEMS технология (фиг.5.7).



Фиг.5.7. Пиезорезистивен акселерометър, изготвен чрез MEMS технология

Пиезорезистивните сензори изменят електрическото си съпротивление, пропорционално на приложеното механично въздействие и като правило имат ниска чувствителност, поради което се използват предимно за измерване на ударни ускорения и нискочестотни вибрации. Намират широко приложение при изпитанията на удароустойчивост при стълкновения с препятствия.

На фиг.5.8 са показани пиезорезистивни акселерометри, предлагани от фирмата ASC GmbH (<http://asc-sensors.com>).

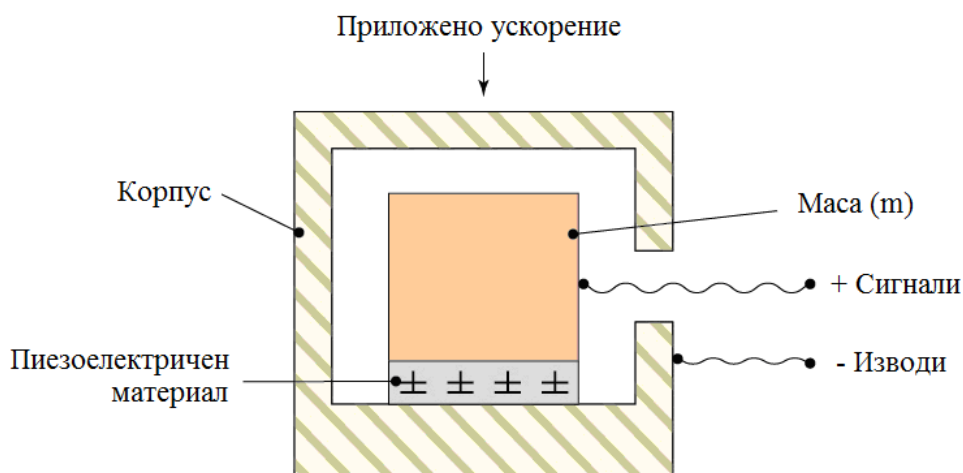


Фиг.5.8. Пиезорезистивни акселерометри, предлагани от фирмата ASC GmbH

5.1.3. Пиезоелектрически акселерометри

Пиезоелектрическите акселерометри генерират електрически заряд, реагирайки на механично натоварване. Честотният диапазон на тези

акселерометри е от няколко херца до 30 kHz. Чувствителният елемент се разполага между корпуса и инерционната маса, на която действа сила, пропорционална на ускорението (фиг.5.9).



Фиг.5.9. Пиезоелектрически акселерометър

В зависимост от типа на изходния сигнал, пиезоелектрическите сензори се разделят на сензори със заряден изходен сигнал и сензори с напрежителен изходен сигнал. Преимуществовата на пиезоелектрическите акселерометри със заряден изход се състоят във възможността за работа при високи температури и в широк амплитуден диапазон, който може да се зададе чрез настройките на усилвателя на заряда. Типичният работен температурен диапазон е $-55^{\circ}\text{C} \dots 288^{\circ}\text{C}$. Предлага се широка номенклатура от акселерометри по отношение на чувствителност, тегло, размери и форма. Тези сензори се използват предимно при измерванията на параметри на вибрации и удари.

На фиг.5.10 са представени пиезоелектрически акселерометри, предлагани от фирмата Kistler Instrument.

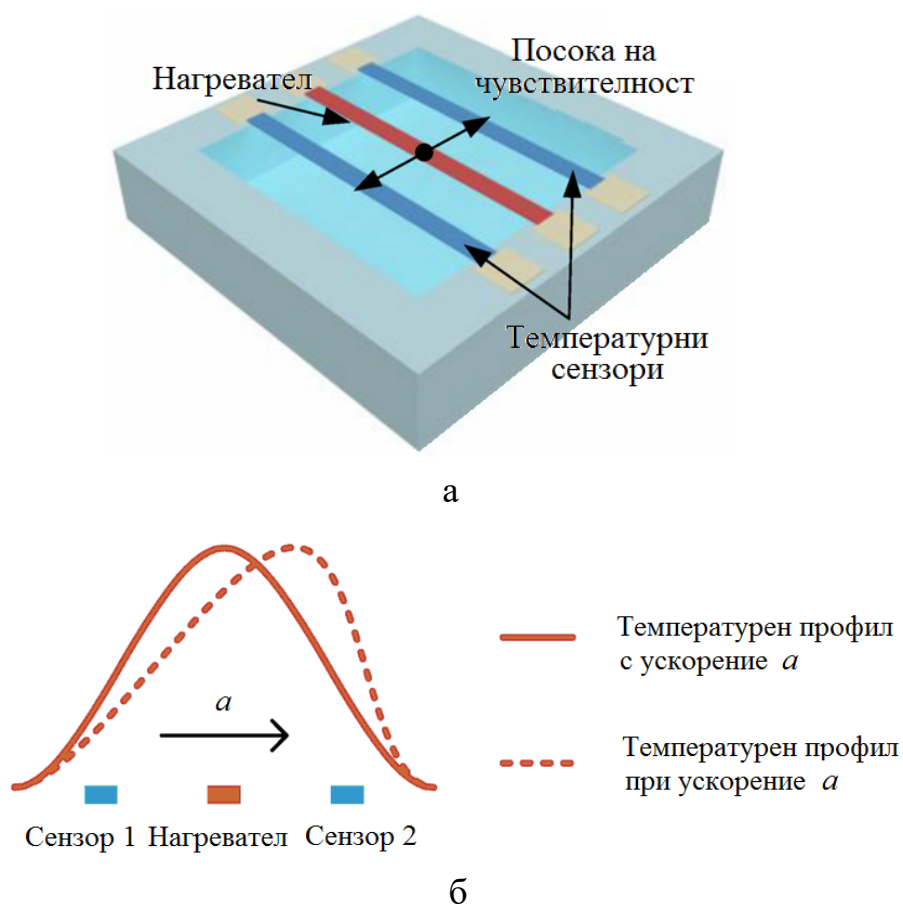


Фиг.5.10. Пиезоелектрически акселерометри, предлагани от фирмата Kistler Instrument

5.1.4. Топлинни акселерометри

Топлинните акселерометри се основават на принципа на свободната конвекция. Те се изготвят чрез използване на MEMC технология. Както е показано на фиг.5.11а, електрическият нагревател е разположен в центъра, а два температурни сензора са разположени от двете страни на нагревателя. Нагревателят е нагрят до по-висока температура и загрява обкръжаващия газ или течност. Температурният профил, който се получава от нагревателя, е симетричен при отсъствие на ускорение (на фиг.5.11б е показан с пълтна линия). В този случай температурите при двата температурни сензора са еднакви. При наличие на ускорение температурният профил се отклонява (на фиг.5.11б е показан с пунктирна линия). Температурната разлика между двете страни на нагревателя се измерва от двата температурни сензора и е пропорционална на ускорението. Така ускорението се преобразува в температурна разлика, която се обработва от електронна схема.

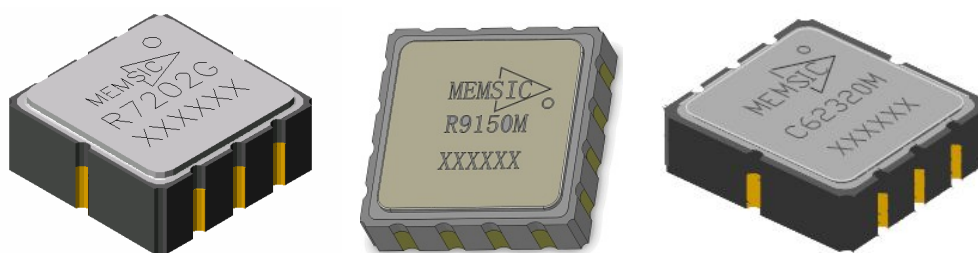
В топлинния акселерометър нагревателят е изработен от метал или поликристален силиций. За да се установи промяната на температурния профил могат да се използват два типа температурни сензори: терморезистори (изработени от метал или поликристален силиций) или термодвойки.



Фиг.5.11. Топлинен акселерометър

Топлинните акселерометри се разработват повече от 20 години, а търговските продукти са на пазара от 2003 г. Фирмата MEMSIC Inc. (<http://www.memsic.com>) предлага едноосни, двуосни и триосни топлинни акселерометри. Едноосният акселерометър работи по описания принцип. Двуосният топлинен акселерометър обикновено се състои от централен нагревател и две двойки температурни сензори, разположени перпендикулярно на двете хоризонтални оси, които могат да измерят двете ортогонални ускорения в равнината.

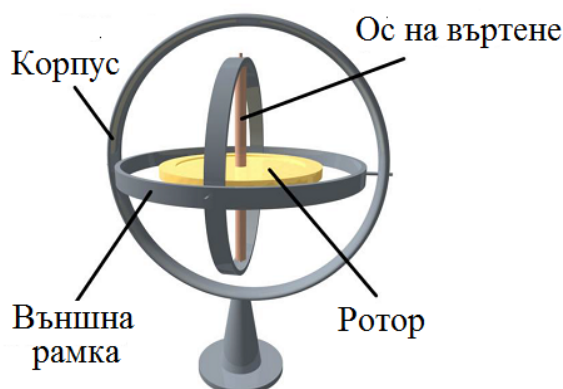
На фиг.5.12 са представени топлинни акселерометри, предлагани от фирмата MEMSIC Inc.



Фиг.5.12. Топлинни акселерометри, предлагани от фирмата MEMSIC Inc.

5.2. Жироскопи

Жироскопът представлява симетрично твърдо тяло, най-често диск, който се върти с голяма ъглова скорост около оста си на симетрия. Основното му свойство е, че оста му се стреми да запази първоначалното си направление в пространството. Принципът на работа на жироскопа се основава на закона за запазване на момента на импулса: моментът на импулса на затворена система (в която отсъстват външни сили) се запазва, т.е. остава неизменен с времето. Жироскопът е предложен през 1852 г. от френския учен Леон Фуко при изобретяване на уред за денонощно наблюдение на въртенето на земята около своята ос. Жироскопите могат да бъдат с една, две или три степени на свобода. На фиг.5.13 е показан класически жироскоп с три степени на свобода.

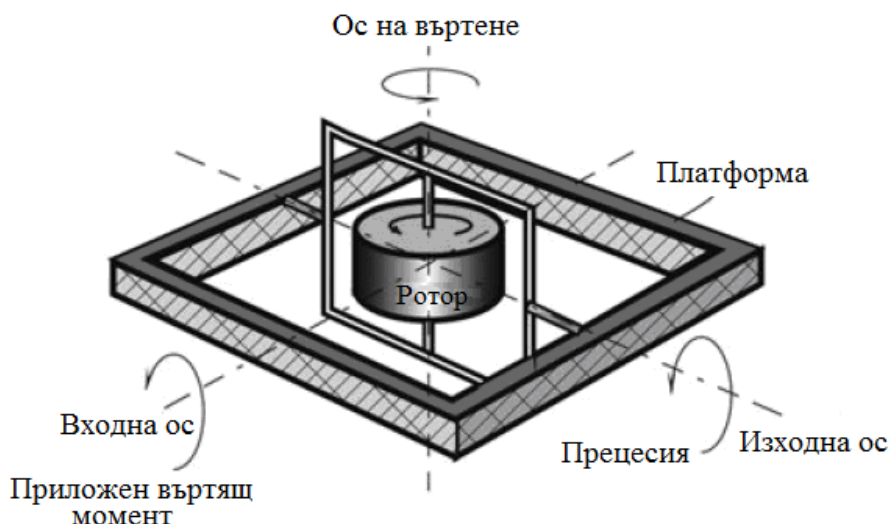


Фиг.5.13. Класически жироскоп с три степени на свобода

Жироскопът представлява сензор за ъглова скорост и се използва за определяне на скоростта на въртене на дадено устройство около всяка ос. Стойностите, получени от жироскопа, могат да се използват за определяне на ориентацията на устройството в пространството.

5.2.1. Роторен жироскоп

Механичният роторен жироскоп се състои от масивен диск, свободно въртящ се около основната ос на въртене. Той е закрепен към рамка, имаща възможност да се върти относно една или две оси (фиг.5.14). Така в зависимост от броя на осите на въртене, жироскопите имат една или две степени на свобода. Основната ос на въртене на жироскопа не променя своето пространствено положение при отсъствие на външни сили, действащи върху нея. Освен това въртящият момент на жироскопа (неговият изходен сигнал) е пропорционален на ъгловата му скорост на движение около оста, перпендикулярна на основната ос на въртене.



Фиг.5.14. Механичен роторен жироскоп

При свободно въртене на диска (ротора) той винаги се стреми да запази своето осово положение. Ако платформата на жироскопа се върти около входната ос, в жироскопа се появява въртящ момент относно перпендикулярната (изходната) ос, заставляящ основната ос на въртене да се завърта около изходната ос. Това явление се нарича прецесия на жироскопа. Прецесията винаги има посока, при която посоките на въртене на ротора и приложения въртящ момент съвпадат.

Жироскопите с въртящ се ротор в течение на много години са били единствените устройства, използвани при изграждане на навигационни устройства. Принципът на действие на тези сензори обаче не позволява да се реализират във вид на миниатюрни устройства. Освен това всички части

на механичните роторни жирокопи изискват висока точност при производството им, което обуславя и високата им цена.

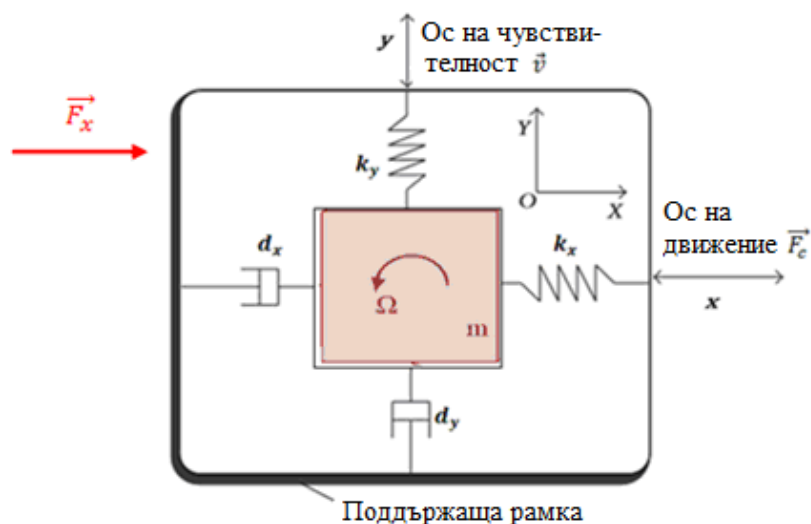
5.2.2. Вибрационен жирокоп

Всички жирокопи от вибрационен тип се основават на ефекта „ускорение на Кориолис”. Този ефект е описан от френския учен Гаспар-Густав де Кориолис през 1835 г. Кориолис е доказал, че при прилагане на законите на Нютон към тела, преместващи се вътре във въртяща се рамка, в уравненията за движение е необходимо да се отчита силата на инерция. Тя е насочена вдясно от посоката на движение на тялото при въртене на рамката против часовниковата стрелка и вляво – при въртене по часовниковата стрелка.

Във вибрационните жирокопи, реализирани по МЕМС технология, въртенето е заменено с вибрации, а по големината на възникващото ускорение се определя скоростта на движение. За разлика от роторните жирокопи, при които инерционната маса се върти, във вибрационните жирокопи масата се движи линейно, извършвайки хармонични колебания.

Ако тялото се движи линейно вътре в опорната рамка, въртяща се около ос, перпендикулярна на посоката на движение, в него възниква ускорение на Кориолис. Съществуват различни конструктивни решения, които се използват в производството на вибрационните жирокопи. Те се определят в зависимост от начина на окачване, броя на вибриращите маси и вида на движението на чувствителния елемент. При изпълнението им цялостната динамична система е с две степени на свобода (фиг.5.15). Силите на Кориолис се появяват вследствие на вибрациите на чувствителния елемент и ъгловата скорост на системата Ω .

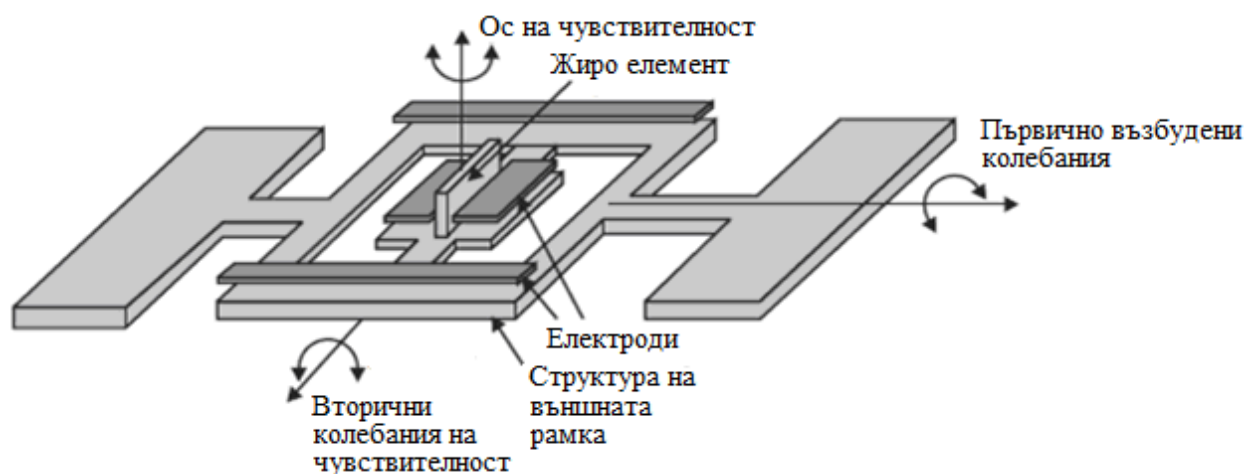
Поради действие на външна сила F_x масата извършва движение с линейна скорост v по ос x . При въртене на жирокопа с ъглова скорост Ω , в резултат на ефекта на Кориолис възниква движение под формата на отклонение по ос y . Силата на Кориолис се измерва чрез регистриране на стойността на отклонението на масата спрямо електроди, фиксирани неподвижно на поддържащата рамка на жирокопа. Разликата в честотите на трептене са пропорционални на ъгловата скорост на жирокопа.



Ω - ъглова скорост на въртене на жиро스코па; ос x и y - съответно ос на движение и ос на чувствителност; k_x и k_y - коефициенти на еластичност; d_x и d_y - коефициенти на затихване

Фиг.5.15. Схема на вибрационен жироскоп

На фиг.5.16 е показан вибрационен жироскоп, който се състои от двурамкова структура, захваната на два въртящи се и огъващи се елементи.



Фиг.5.16. Вибрационен жироскоп

Структурата има вътрешни прорези, осигуряващи свободно движение на подвижните части в активната област. По време на работа на външната рамка действа въртящ момент, възникващ вследствие на електростатичните сили, появяващи се при подаване към електродите на съответно управляващо напрежение. В резултат на това тя извършва колебателни движения с постоянна амплитуда. Тези вибрации се предават на вътрешната рамка чрез вътрешния огъващ елемент, вследствие на което инерционната маса също започва да се колебае. Ако при това

жироскопичният елемент извършва движение с ъглова скорост Ω , около оста, насочена перпендикулярно на плоскостта на устройството, силата на Кориолис принуждава вътрешната рамка да вибрира относно изходната ос с честота, равна на управляващата честота и амплитуда, пропорционална на входната ъглова скорост Ω .

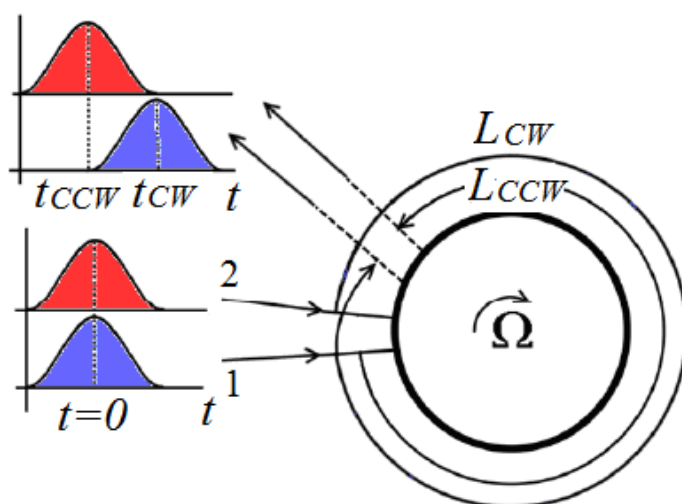
Стойността на входната ъглова скорост се определя от изменението на капацитета между вътрешната рамка и двойката електроди.

Вибрационните жироскопи са с много добра устойчивост и издръжливост и като цяло предлагат по-ниска цена от всички други жироскопични технологии.

5.2.3. Оптични (лазерни) жироскопи

Работата на лазерния жироскоп се основава на използването на така наречения ефект на Саняк (Sagnac effect). Той е открит през 1913 г. от Джордж Саняк (Georges Sagnac) в резултат на изследването на динамиката на въртене на Земята. Ефектът на Саняк се състои в това, че два оптични лъча, които се разпространяват противоположно в пръстеновидна структура, променят относителната си фаза, ако пръстенът се върти (фиг.5.17). Съответно единият лъч се движи по часовниковата стрелка (CW), а вторият – против часовниковата стрелка (CCW). По този начин се получава разлика в оптичния път, която е пропорционална на ъгловата скорост на пръстена.

На фиг.5.17 е илюстриран ефектът на Саняк. Пръстен се върти около ос, перпендикулярна на равнината на пръстена, с ъглова скорост Ω . Различните оптични пътища на светлинните лъчи, предизвикани от въртенето на пръстена, са съответно L_{CW} и L_{CCW} .



Фиг.5.17. Илюстрация на ефекта на Саняк

Оптичните жирокопи са две основни разновидности - кръгови лазерни жирокопи (Ring Laser Gyroscope, RLG) и влакнесто-оптични жирокопи (Fiber Optic Gyroscope, FOG).

- **Кръгов лазерен жироскоп с пръстен (Ring Laser Gyroscope, RLG)**

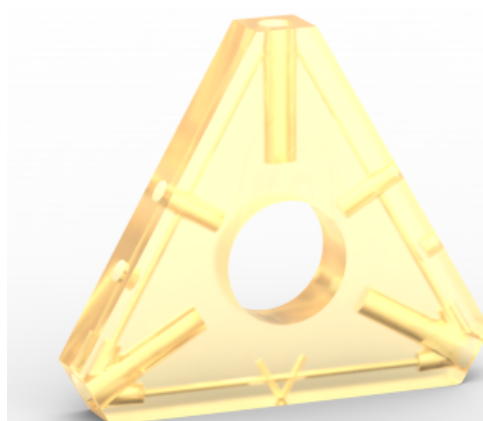
Основната концепция при създаване на кръговия лазерен жироскоп е генерирането на два лъча, разпространяващи се противоположно в затворен от три или повече огледала контур. Това устройство е изградено като резонатор и при създаване на резонанс на системата, светлината циркулира многократно в затворения контур. При наличие на ъглова скорост Ω на резонатора разликата в дължината на оптичния път, изминат от двете вълни, предполага и разлика в честотите им. На фиг.5.18а са показани основните елементи в конфигурацията на този жироскоп.

Тялото на лазерния жироскоп е направено от триъгълен стъклен блок (фиг.5.18б). В стъкленото тяло се пробиват три въздушни канала и на всеки ъгъл се разполагат три огледала, за да се създаде триъгълен оптичен резонатор. Трите канала се запълват с газова смес He-Ne с ниско налягане. Чрез два анода и катод се подава високоволтов електрически разряд. В оптичните канали се генерират два независими противоположни лазерни лъча (по посока на часовниковата стрелка и обратно на часовниковата стрелка), резониращи със същата честота. Чрез частично отразяващо огледало се дава възможност да се определи ъгловата скорост на въртящата се система, като се отчита промяната на честотата на резонанса на устройството, генерирана от взаимодействието на двата лазерни лъча.

Точността на кръговия лазерен жироскоп се определя от размера на оптичния контур. Поради това тези жирокопи са изключително точни за специфични приложения, където габаритите не са проблем.



а

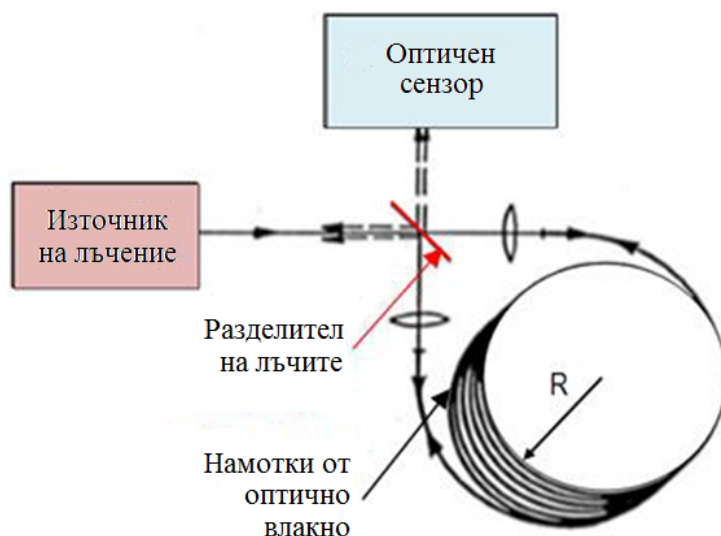


б

Фиг.5.18. Кръгов лазерен жироскоп, реализиран с триъгълен оптичен резонатор

- **Влакнесто-оптичен жирокоп (*Fiber Optic Gyroscope, FOG*)**

Тъй като фазовата разлика (ефектът на Саняк) е пропорционална на скоростта на въртене, чувствителността се подобрява като се използват многооборотни намотки, с цел да се увеличи ефективната площ на системата. Това е първоначалната причина за появата на влакнесто-оптичния жирокоп. Жироскопичният ефект при него се постига във влакнесто-оптична серпентина - основен елемент в общата схема на устройството, показана на фиг.5.19.



Фиг.5.19. Влакнесто-оптичен жирокоп

Източник на светлина излъчва електромагнитна вълна с определена честота, която се насочва към намотка от оптично влакно. Светлинният лъч първоначално се разделя от разделител на лъчи (сплитер), така че двете половини на вълната се разпространяват в противоположни посоки. При наличие на ъглова скорост на жирокопа около ос, перпендикулярна на равнината на намотката, ефективната дължина на оптичния път на двете вълни се променя по начин, подобен на кръговия лазерен жирокоп.

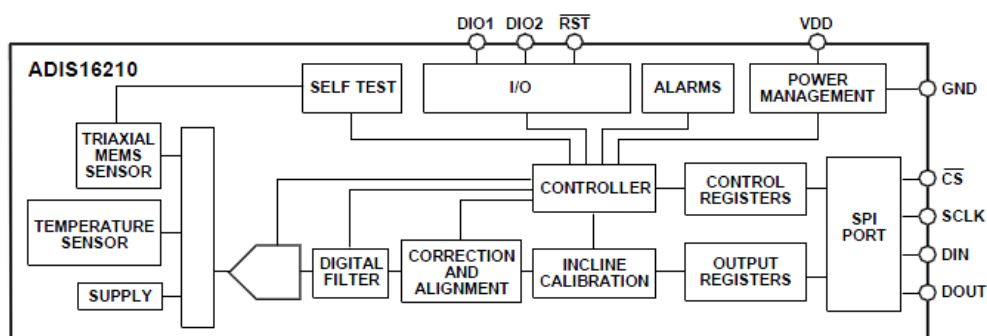
Жирокопите се прилагат за следене на положението на даден обект и изработване на електрически сигнал при промяната му. В част от случаите сигналът въздейства на изпълнителни механизми за възстановяване на положението. Съществуват комбинирани модули, съдържащи акселерометър и жирокоп.

5.3. Инклинометри

Земната гравитация се характеризира с постоянна сила, насочена към центъра на Земята и предизвиква ускорение $1\text{ g} \approx 9,8\text{ m/s}^2$. Едно възможно приложение на акселерометъра е да определя посоката на гравитация, а след това - да измерва нейната големина. Тези специални акселерометрите

често се наричат инклинометри или сензори за наклон (tilt sensors) и са предназначени да измерват ъгъла на наклона на различни обекти по отношение на гравитационното поле на Земята.

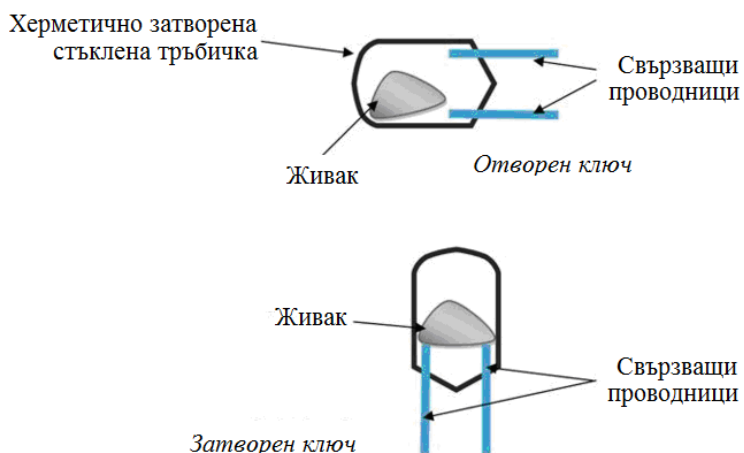
На фиг.5.20 е показана функционалната блокова схема на прецизен триосен инклинометър с SPI интерфейс ADIS16210, предлаган от фирмата Analog Devices, Inc. ADIS16210 е цифрова система за наклон, която осигурява прецизни измервания както за ъглите на наклона, така и за ъглите в диапазон на пълна ориентация от $\pm 180^\circ$. Той съчетава MEMS триосен сензор за ускорение с обработка на сигналите, адресируеми потребителски регистри за събиране на данни и програмиране и SPI съвместим сериен интерфейс. На изхода на ADIS16210 се получава цифров код, съответстващ на ъгъла на наклона.



Фиг.5.20. Функционална блокова схема на прецизен триосен инклинометър с SPI интерфейс ADIS16210

Ако е необходимо да се определи само посоката на гравитация с невисока точност, съществуват несложни и евтини инклинометри. Реакцията на такъв сензор не е функция на големината на вектора на гравитация, а само на неговата посока. Той има своя собствена вътрешна ос, по отношение на която се определя посоката на гравитация.

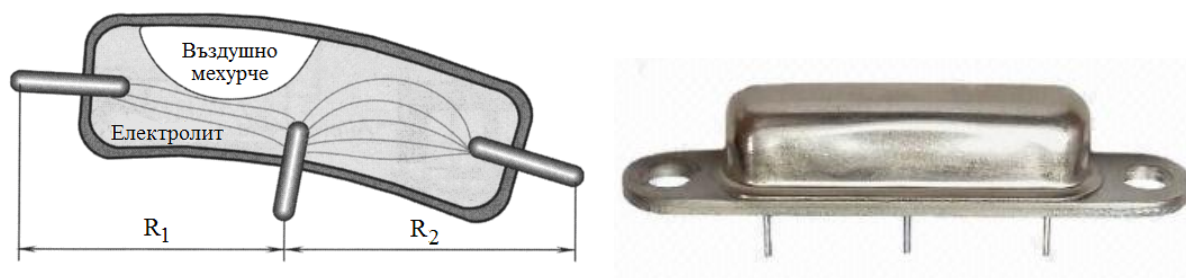
Един традиционен сензор е живачният превключвател (фиг.5.21).



Фиг.5.21. Инклинометър на базата на живачен превключвател

Той е направен от непроводяща (често стъклена) тръбичка, която има два електрически контакта и капка живак. Когато сензорът е позициониран по такъв начин, че живакът да се плъзне от контактите, превключвателят е отворен. Промяната на положението на превключвателя принуждава живака да се придвижи към контактите и да докосне и двата, като по този начин той се затваря.

Ако е необходимо да се измерва наклонът, се изисква по-сложен сензор. Такъв е показан на фиг.5.22 и се нарича електролитен сензор за наклон (electrolytic tilt sensor).



Фиг.5.22. Електролитен инклинометър

Леко извита стъклена тръбичка е напълнена с частично проводим електролит. В нея са вградени три електрода: два в края и третият електрод е в центъра на тръбичката. В тръбичката се намира въздушен балон, който може да се движи по дължината ѝ, когато тя се наклонява. Електрическите съпротивления между централния електрод и всеки от крайните електроди зависят от положението на балона. Тъй като тръбичката се отклонява от позицията на баланса, съпротивленията се увеличават или намаляват пропорционално. Електродите са свързани в мостова схема, която се захранва от променливо напрежение. Електролитните сензори за наклон се предлагат с различни конструкции за широк спектър от ълови диапазони от $\pm 0,5^\circ$ до $\pm 80^\circ$.

Сензорите за наклон се използват в земни и въздушни превозни средства, пътно строителство, инструменти за машини, инерционни навигационни системи, дисплеи на мобилни преносими устройства (за контрол на ориентацията на изображение), роботи, електронни игри и други.

ГЛАВА 6. СЕНЗОРИ ЗА НАЛЯГАНЕ

Физичното понятие налягане се определя като ефект, който се предизвиква, когато сила бъде приложена върху определена площ. Налягането се описва със зависимостта

$$P = \frac{F}{S}, \quad (6.1)$$

където с P се означава налягането, с F – силата, а с S – площта на повърхността, върху която действа силата.

Основна единица за измерване на налягане в SI е Pa (Pascal). Големината на един Pa се определя като един N (Newton) на m^2 (квадратен метър) –

$Pa = \frac{N}{m^2}$. Освен в паскали Pa, налягането в практиката често се измерва и

в други единици като: psi (pounds per square inch), atm (atmosphere), bar, милиметър живачен стълб – често означаван и като torr.

Съответствието на отделните единици спрямо приетата в SI единица Pa е показано в табл.6.1.

Таблица 6.1. Съответствие между различните единици за налягане

Единица	Съответствие в Pa
1 psi	6894,757
1 bar	100000
1 atm	101325
1 torr	133,322

Като понятия при измерването на налягане се въвеждат:

- атмосферно налягане - това е налягането на атмосферата върху земната повърхност. Налягането на атмосферата при морското равнище се приема за 101,325 kPa. С увеличаване на надморската височина това налягане намалява;

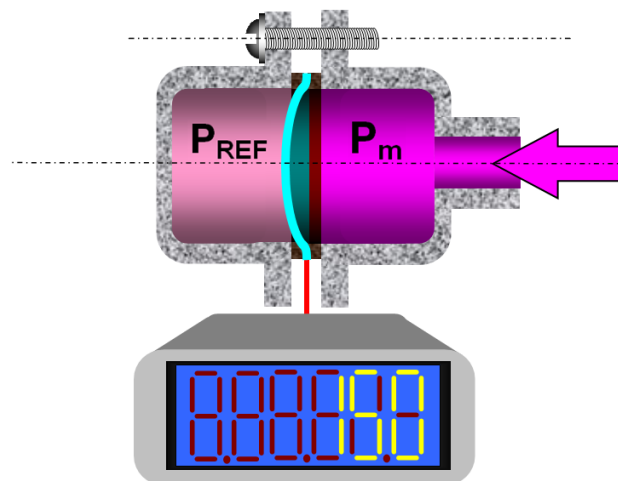
- налягане от 0 Pa се приема като абсолютен вакуум (total vacuum);
- налягания между атмосферното и абсолютния вакуум представляват вакуум.

6.1. Видове сензори за налягане според метода на измерване

В практиката основно се измерва налягането на течности и газове. За целта са разработени множество сензори, най-общо отчитащи налягането посредством няколко основни метода.

6.1.1. С абсолютно измерване

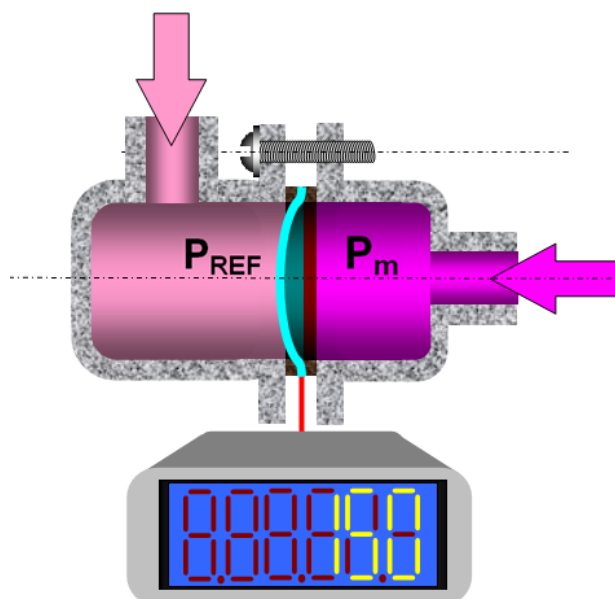
При този вид сензори (фиг.6.1) налягането се определя спрямо вакуум.



Фиг.6.1. Абсолютно измерване на налягането

6.1.2. Калибрирани сензори

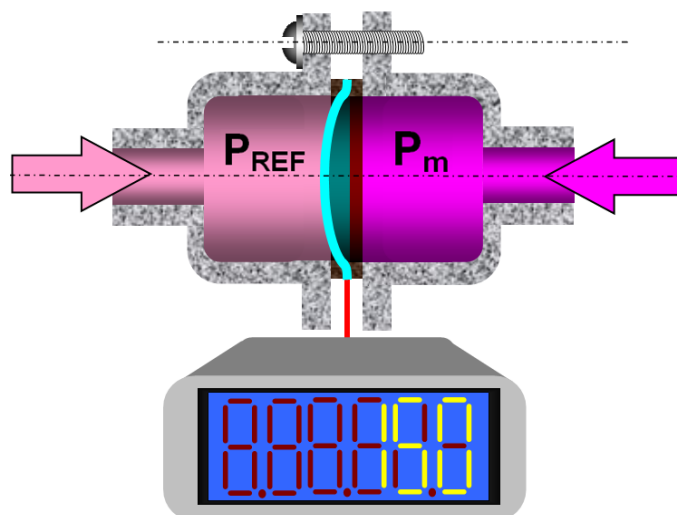
Този тип сензори измерват налягането спрямо атмосферното (фиг.6.2). Като опорно налягане се използва атмосферното налягане. Разновидност на този тип сензори са тези, които определят налягането спрямо атмосферното налягане на морското ниво.



Фиг.6.2. Калибрирано измерване на налягането

6.1.3. С диференциално измерване

Този тип сензори (фиг.6.3) измерват налягането спрямо дадено опорно налягане. Тези сензори имат принцип на работа, подобен на калибрираните (gauge) сензори, но опорното налягане се различава от атмосферното и при измерването със сензора се измерва разликата между приложеното и опорното налягане.



Фиг.6.3. Диференциално измерване на налягането

6.2. Видове сензори според принципа им на действие

За отчитане на налягането са разработени множество манометри с различна механична конструкция или на базата на преместване на течност в тръбичка вследствие на налягането. За целите на автоматизацията интерес представляват сензорите за налягане с електрически сигнал на изхода, който може да се свърже към различно оборудване за мониторинг и контрол.

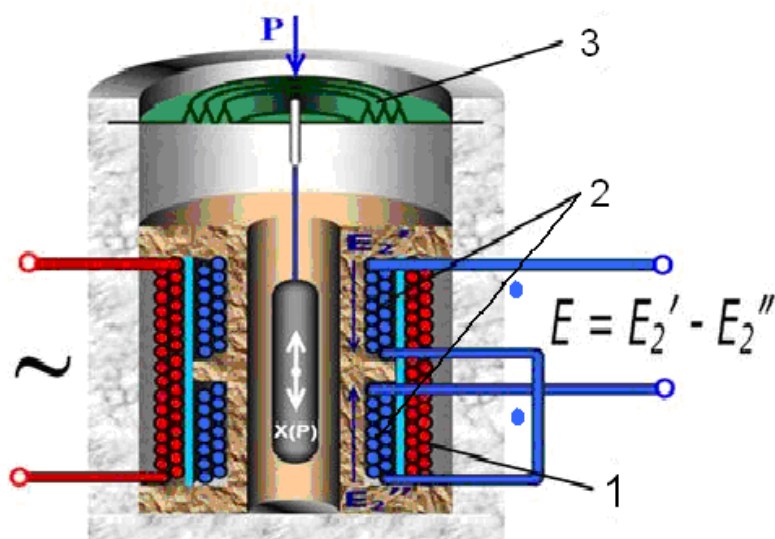
Най-често използваните сензори за налягане включват в конструкцията си диафрагма (или мембрана). Мембраната представлява пластина, която под действие на налягането се огъва и степента на огъване зависи от големината на приложеното налягане.

По-долу са разгледани, някои от най-разпространените конструкции на такива сензори, намиращи приложение в практиката при измерване на налягане.

6.2.1. Взаимноиндуктивни сензори

Конструкцията на този тип сензори включва диференциален трансформатор, чиято сърцевина е свързана с мембраната на сензора (фиг.6.4).

Под действието на налягането мембраната се огъва, вследствие на което сърцевината на диференциалния трансформатор се премества. Двете вторични намотки на трансформатора са свързани противоположно (несъгласувано). Първичната намотка се захранва със синусоидално напрежение. Когато сърцевината е в центъра на трансформатора, генерираният на изхода сигнал има нулева стойност. При преместване на сърцевината амплитудата на изходния сигнал се изменя в зависимост от преместването. Посоката на преместването може да се определи от фазовата разлика между входния и изходния сигнал.

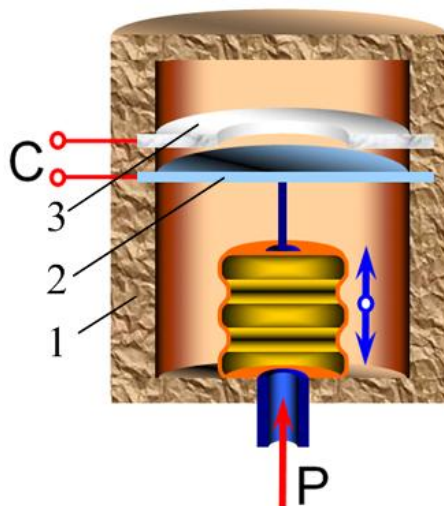


1- първична бобина; 2- вторични бобини; 3- мембрана

Фиг.6.4. Взаимоиндуктивен сензор за налягане

6.2.2. Капацитивни сензори

Под действие на налягането се деформира мембрана, която играе ролята на едната плоча на кондензатора (фиг.6.5). При преместването ѝ се променя капацитета на кондензатора. Посредством подходяща електронна схема промяната на капацитета лесно може да бъде преобразувана в промяна на изходния сигнал на сензора.



1- тяло на сензора; 2 – мембрана; 3 - електроди

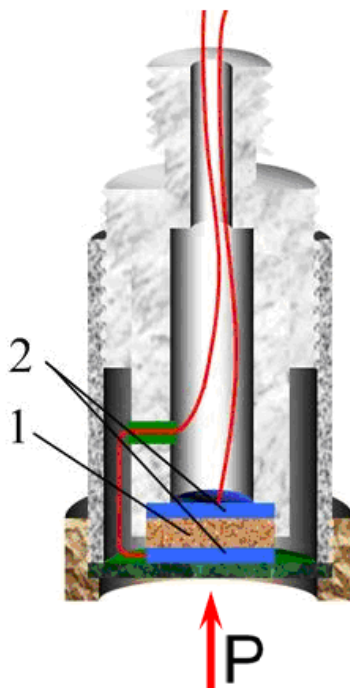
Фиг.6.5. Капацитивен сензор за налягане

6.2.3. Пиезоелектрически сензори

При този тип сензори се използва пиезоелектрическият ефект на един или няколко пиезокристали, свързани към мембраната на сензора (фиг.6.6).

При деформация на мембраната пиезокристалът генерира заряд, който зависи от приложеното върху мембраната налягане.

Този тип сензори са подходящи за измерване на динамично променящо се налягане.

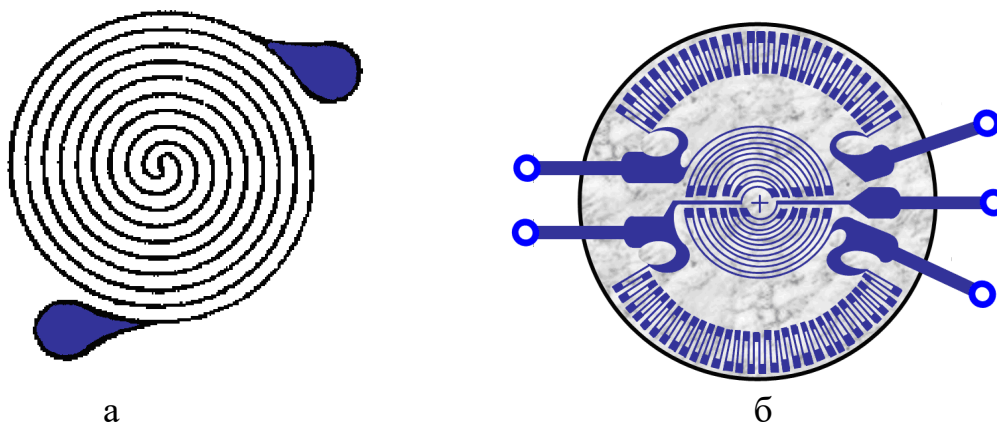


1- пиезоелемент; 2- електроди

Фиг.6.6. Пиезоелектрически сензор за налягане

6.2.4. Тензорезисторни сензори

Този тип сензори са едни от най-често използваните, като са разработени голям брой конструкции, използващи тензорезистори. Тензорезисторите се изготвят с подходяща форма (фиг.6.7) и се разполагат върху деформируемата мембрана.



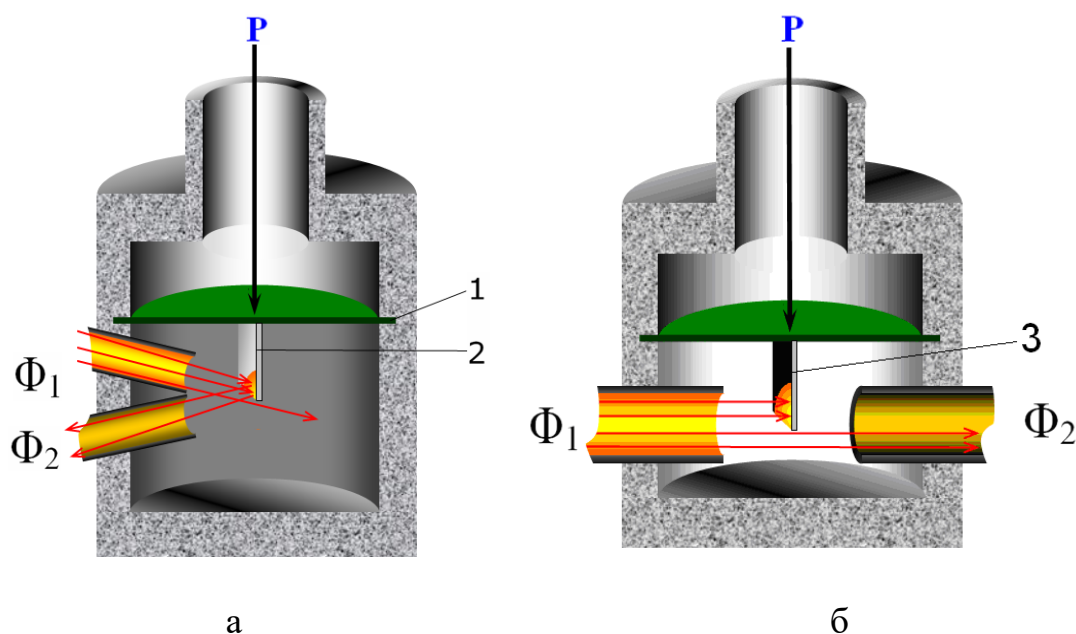
Фиг.6.7. Тензорезистори, използвани за измерване на налягане

Вследствие на налягането мембраната се деформира заедно със залепените към нея тензорезистори. При това те изменят съпротивлението си. Промяната на съпротивлението лесно може да се преобразува в изходен сигнал, който съответства на приложеното върху сензора налягане. Тензорезисторният елемент от фиг.6.7б представлява тензорозетка, която се състои от 4 тензорезистора, образуващи четирите рамена на мост за постоянен ток.

6.2.5. Оптични сензори

Оптичните сензори могат да работят на принципа на отразяването или на пропускането на светлината (фиг.6.8).

При първия тип сензори (фиг.6.8а) върху мембраната се поставя отразяващ елемент, който в зависимост от приложеното налягане и огъването на мембраната отразява определено количество от постъпващата светлина обратно към приемника. При сензорите с пропускане на светлината (фиг.6.8б) прикачената неподвижно към мембраната преграда при повишаване на налягането намалява количеството светлина, която постъпва към приемника.



1 – мембрана; 2 – рефлекторен елемент; 3 - преграда

Фиг.6.8. Оптични сензори за налягане

ГЛАВА 7. СЕНЗОРИ ЗА ПОТОК

Под термина поток се разбира движението на течности или газове през тръби или отворени канали. Той се характеризира най-често с параметрите си дебит/разход и скорост на потока.

Под дебит/разход на потока се разбира количеството флуид – течност или газ, което преминава за определено време през тръби или отворени канали. При измерването на дебит/разход на течности или газ се използват единици, отнасящи се до обема или теглото на потока за определено време.

Основната обемна единица е m^3/s , която определя обемът на преминалия газ или течност за единица време. Като допълнителна единица може да се използва l/s , която определя преминалият обем течност или газ в литри за единица време. Дебитът/разходът на даден флуид може да се определи чрез произведението на скоростта на потока и площта на напречното сечение на тръбата или канала, през които преминава.

При тегловно измерване на дебит/разход се използва единицата kg/s . Тя определя теглото на преминалата маса на флуида (в килограми) за единица време.

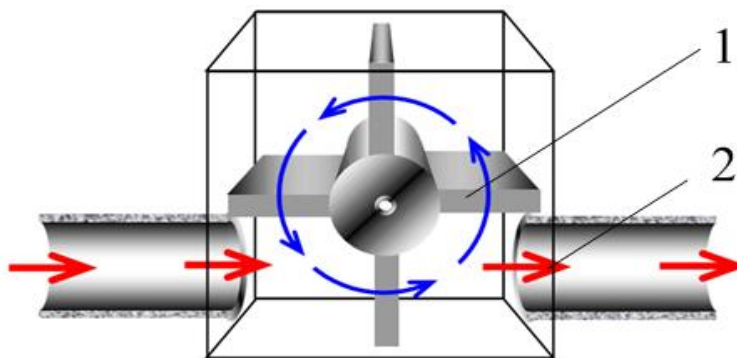
Друга използвана обемна единица за измерване на дебит/разход е ft^3/s (кубически фута за секунда), а тегловна - lb/s (паунда за секунда).

7.1. Ротационни сензори за поток

При ротационните сензори за поток се преобразува въртеливото движение на ротор, задвижван от перка или турбина, в показание за стойността на потока. При увеличаване на потока се увеличава скоростта на въртене на ротора.

7.1.1. Сензори за поток с перка

Конструкцията на този преобразувател за поток се базира на използването на перка, задвижвана от потока (фиг.7.1).



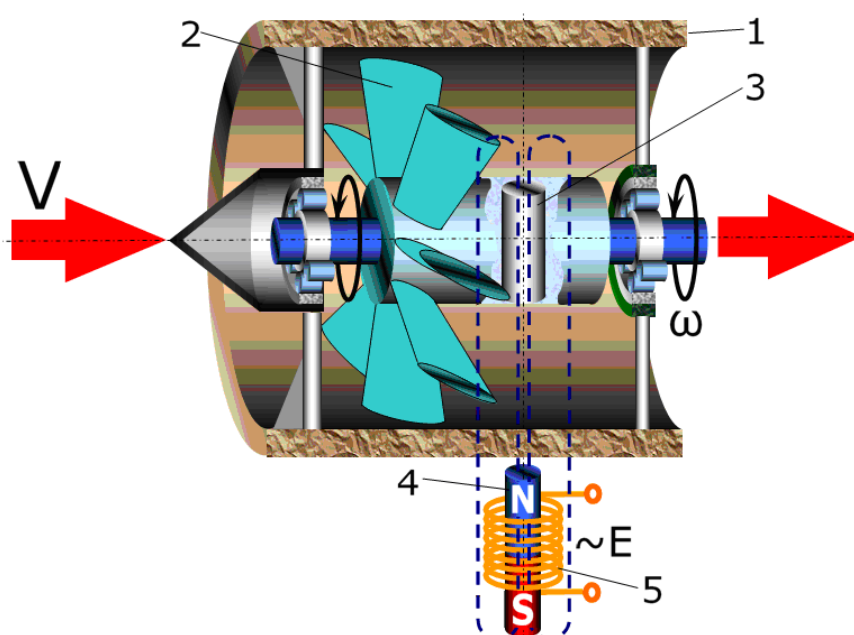
1 – перка; 2- поток

Фиг.7.1. Ротационен сензор за поток с перка

Въртенето на перката се следи от сензори и може да се отчита електронно с помощта на измервателна схема. Това е една от най-евтините конструкции на преобразуватели за дебит/разход, които намират приложение в практиката.

7.1.2. Сензори с турбина и индукционен преобразувател

При този тип преобразуватели роторът с прикачената към него турбина се монтира в центъра на тръбата и при движението си флуидът (течност или газ) завърта турбината (фиг.7.2).



1 - тръба от немагнитен материал; 2 – турбина; 3 – феромагнитна пръчка; 4 - постоянен магнит; 5 - бобина

Фиг.7.2. Ротационен сензор за поток с турбина

В турбината е пресована феромагнитна пръчка. Извън тръбата, но в непосредствена близост с нея, е разположен постоянен магнит, а около него – измервателна бобина. Постоянният магнит създава магнитен поток, който е максимален, когато пръчката застане успоредно на него и минимален, когато застане перпендикулярно. Вследствие на изменението на магнитния поток в бобината се индукира е.д.н., което е пропорционално на скоростта на въртене на турбината

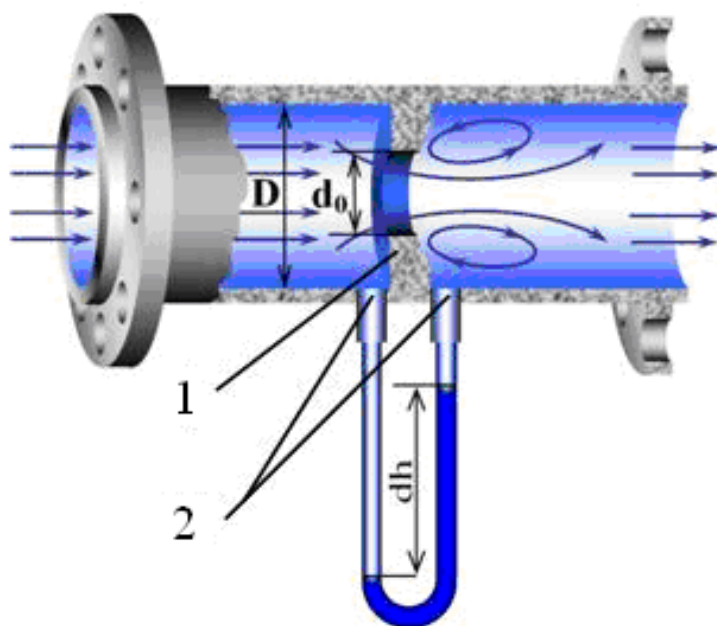
$$E = f(\omega) \quad , \quad (7.1)$$

респективно – на скоростта v на потока. На основата на тази скорост се пресмята и дебитът/разходът на флуида.

7.2. Сензори за поток на основата на измерване на налягане

7.2.1. С калибриран отвор

Калибрираният отвор представлява метална диафрагма с отвор, разширяващ се по посока на движение на течността или газа (фиг.7.3). Тя е монтирана перпендикулярно на посоката на потока. От двете страни на отвора има измервателни отвори, където се отчита налягането в тръбата преди и след него. Разликата в двете налягания се използва при определяне на големината на потока.

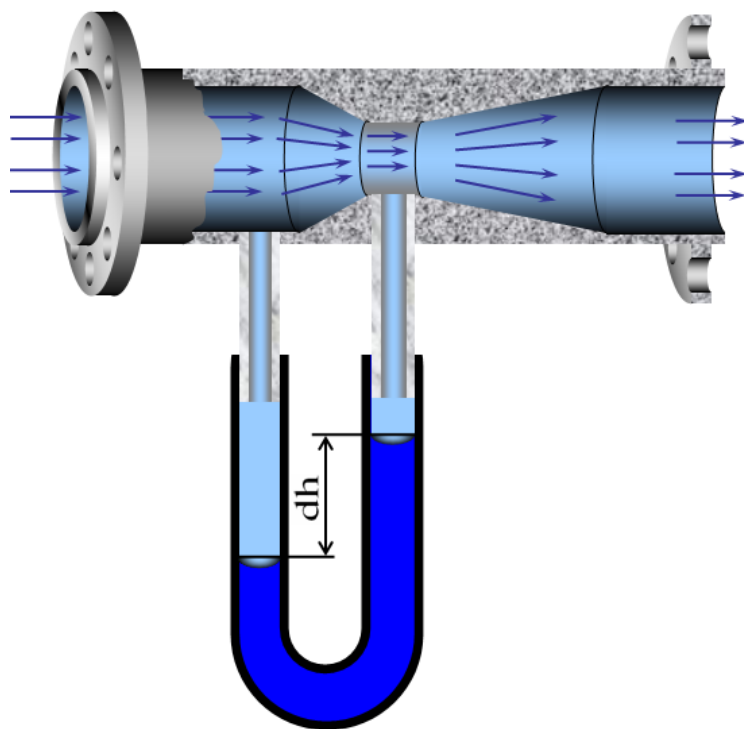


1 – калибриран отвор; 2 – измервателни отвори

Фиг.7.3. Сензор за поток с калибриран отвор

7.2.2. С тръба на Вентури

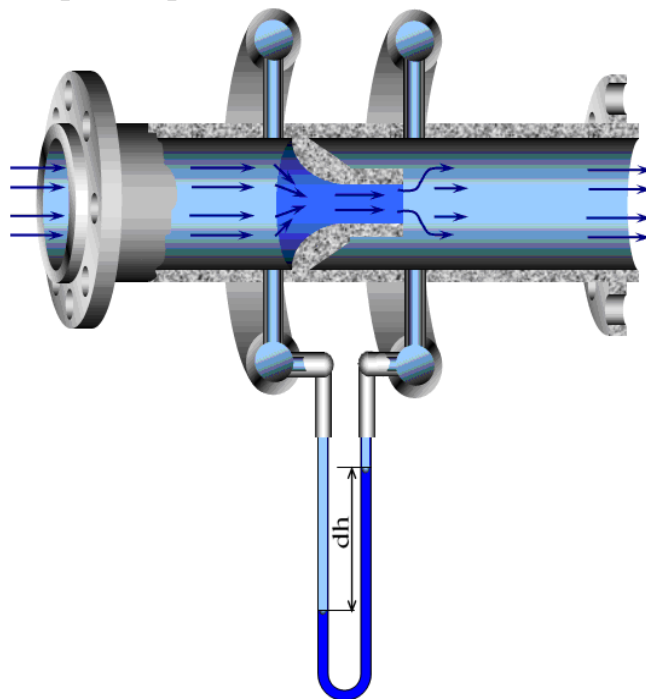
Измерването на поток с тръба на Вентури (фиг.7.4) използва същия принцип, както и преобразувателите за поток с калибриран отвор, а именно - разлика в наляганията. В сравнение с измерването на поток с преобразувателите с калибриран отвор, тези с тръба на Вентури създават по-малка турбулентция. Поради това те не намират приложение в тръби с голям диаметър. Отворите за измерване на налягането се разполагат в най-широката и съответно – в най-тесната част в тръбата на Вентури.



Фиг.7.4. Сензор за поток с тръба на Вентури

7.2.3. С дюза

Този тип преобразуватели за поток (фиг.7.5) действа по подобен начин на тези с калибриран отвор и тръба на Вентури. Геометрията на дюзата се определя от диаметъра на тръбата.



Фиг.7.5. Сензор за поток с дюза

7.3. Ултразвукови сензори за поток

Ултразвуковите преобразуватели на поток измерват промяната на времето на преминаване на ултразвуков сигнал по посока и обратно на посоката на движение на потока. Ултразвуковият сигнал, изпратен по посока на движение на течността, има по-висока скорост от сигнала, движещ се в обратна посока на флуида.

Използват се следните методи за отчитане на потока с помощта на ултразвук:

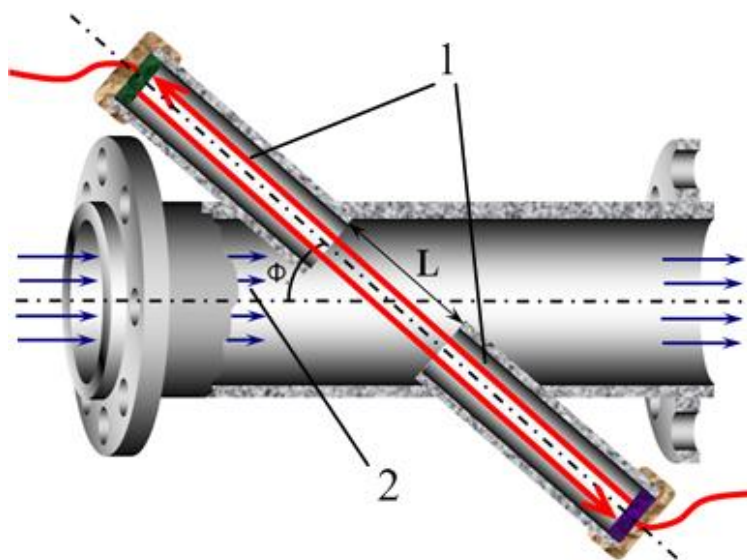
- с непрекъснат ултразвуков сигнал;
- с генериране на импулси с ултразвукова честота;
- посредством използване на Доплеровия ефект.

7.3.1. С непрекъснат ултразвуков сигнал

Когато се използва непрекъснат ултразвуков сигнал, между излъчения и приетия сигнал се появява фазова разлика, посредством която се определя големината на потока.

7.3.2. С генериране на импулси с ултразвукова честота

При измерването посредством генериране на импулси (фиг.7.6) се излъчват импулси от двата ултразвукови сензора, съответно по посока и обратно по посоката на движение на флуида или газа. Измерва се времето на приемане на импулсите, като големината на потока се определя вследствие на разликата във времето на приемане на импулсите, движещи се в двете посоки.



1 - ултразвукови излъчватели-приемници; 2 - поток

Фиг.7.6. Ултразвуков сензор за поток

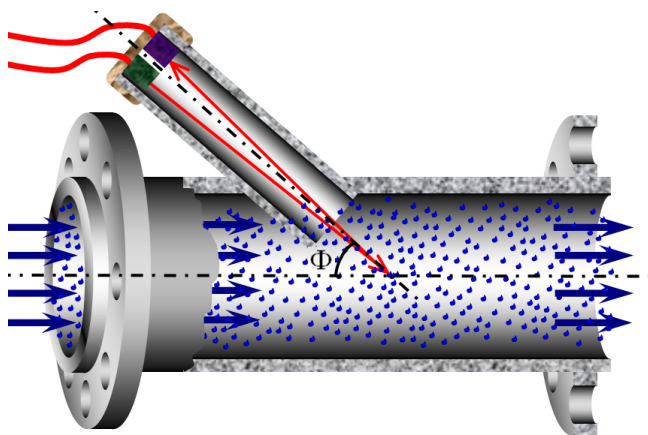
7.3.3. Посредством използване на Доплеровия ефект

Друг метод за измерване на поток посредством ултразвук е с помощта на така наречения Доплеров ефект. Доплеровият ефект се състои в промяната на приеманата от наблюдателя честота или дължина на вълната, когато източникът и/или наблюдателят (приемникът) се движат по направление между тях. Честотата се увеличава, когато източникът и наблюдателят се доближават, и намалява, когато се отдалечават.

Промяната на честотата при положение, че и източникът, и приемникът се движат, се дава с формулата

$$f' = f \cdot \left(\frac{v \pm v_0}{v \mp v_s} \right), \quad (7.2)$$

където f' е приеманата честота, f - излъчената честота, v - скоростта на звука, а v_0 и v_s са съответно скоростите на наблюдателя и излъчвателя.



Фиг.7.7. Ултразвуков сензор за поток посредством Доплеров ефект

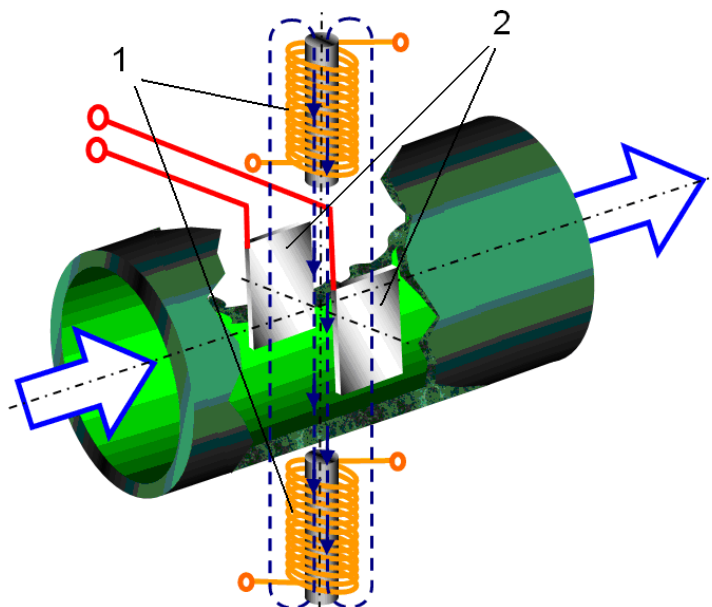
При ултразвуковия сензор за поток посредством Доплеров ефект (фиг.7.7) се следи отражението на ултразвуковия сигнал от движещите се в потока частици. При достигането на частица ултразвуковият сигнал се отразява, като с това изменя и честотата си. Разликата в честотите се използва за определяне на скоростта на потока. Като недостатък на метода може да се посочи, че с увеличаване на броя на частиците се увеличава и евентуалната грешка от измерването.

7.4. Магнито-индуктивни сензори за поток

Магнито-индуктивните сензори за поток (фиг.7.8) се основават на свойството, че ако проводник с дадена дължина l се движи в магнитно поле, перпендикулярно на магнитните линии, в проводника се индуцира електродвижещо напрежение.

Ролята на движещия се проводник в случая играе течността, която трябва да е електропроводима. От двете страни на тръбата са разположени електроди, които на практика определят дължината l на проводника.

Индуцираното напрежение е пропорционално на скоростта на движение на флуида. Точността на този тип преобразуватели е значителна, но за сметка на по-високата им цена.

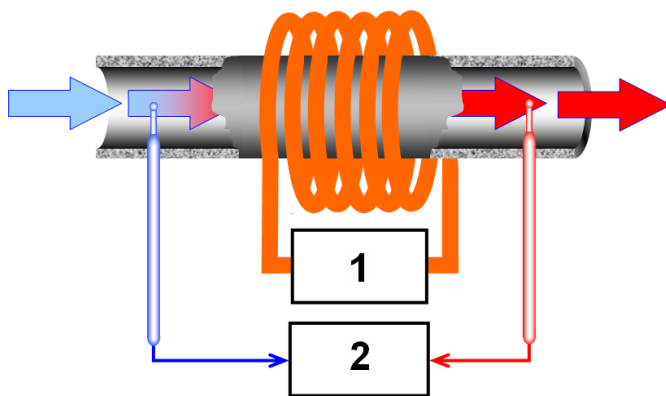


1- индуциращи намотки; 2- електроди

Фиг.7.8. Магнито-индуктивен сензор за поток

7.5. Калориметрични сензори за поток

Методът се базира на разпространение на температурата, създадена от нагревател, която се измерва от два сензора, разположени симетрично на нагревателя (фиг.7.9).



1 – управление на нагревателя; 2 – измервателен блок

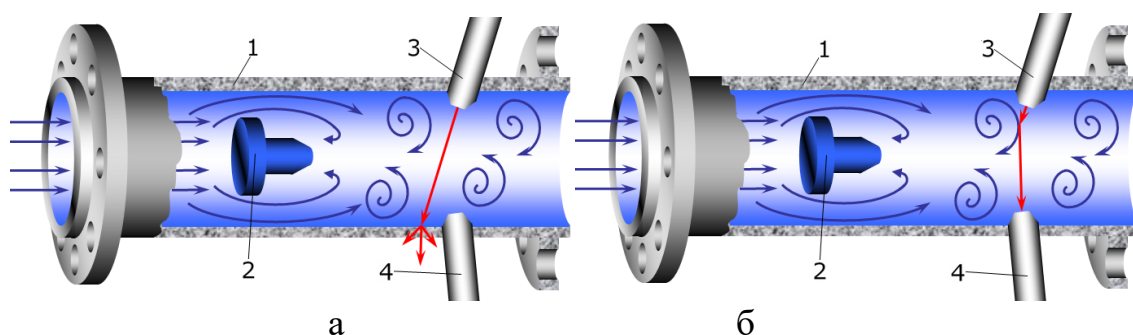
Фиг.7.9. Калориметричен сензор за поток

Скоростта на движение на флуида или газа е пропорционална на разликата в показанието на двата сензора. Принципът на работа включва и компенсиране на температурата на самия флуид, за да може да се постигне добра точност на измерването.

7.6. Вихрови (vortex) сензори за поток

Вихровите преобразуватели за поток (фиг.7.10) са базирани на принципа на завихрянето на течностите или газовете, ако по техния път на движение се постави препятствие. Те не съдържат движещи се части, което за някои приложения е от голямо значение. Честотата и броят на образувалите се завихряния е са пропорционални на потока. Използваният в тези преобразуватели на поток метод е удобен за измерване на по-големи скорости на движение на флуида, докато при ниски скорости грешката нараства.

Самият брой на завихрянията може да се измерва посредством термистори, ултразвукови и оптични сензори, както и чрез тензопреобразуватели, капацитивни и пиезоелектрически сензори.



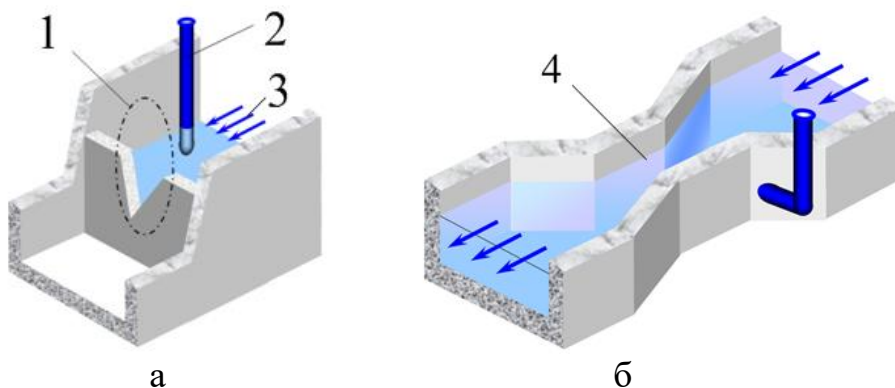
1 - посока на потока; 2 - препятствие; 3 и 4 - сензори за отчитане на завихрянията

Фиг.7.10. Вихров сензор за поток

7.7. Сензори за поток за отворени канали

Често в практиката се налага измерване на поток на течност в отворени канали. В този случай основно се използват два метода:

- с преливници (фиг.7.11а);
- с подаващи канали (фиг.7.11б).



1 - преливник; 2 - сензор за ниво; 3 - улей; 4 - измервателен канал

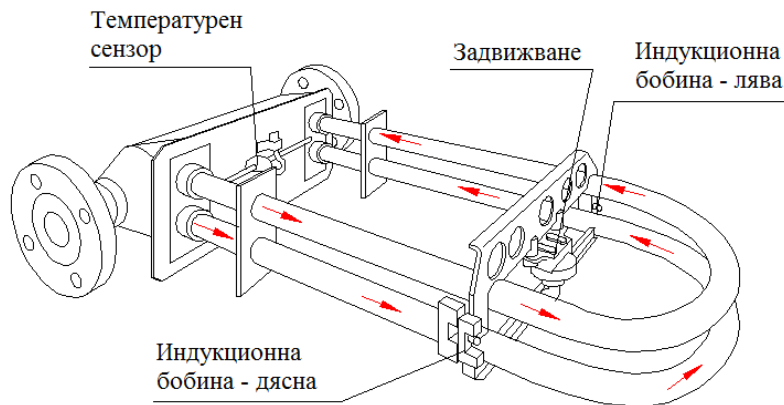
Фиг.7.11. Сензори за поток при отворени канали

7.8. Кориолисов сензор за поток

Този тип сензор измерва пряко масовия разход. При това отпада необходимостта от превръщане на обемния разход в масов чрез допълнителни измервания и математически изчисления. Кориолисовите сензори не зависят от налягането на течността, както и от нейната температура, вискозитет и плътност. Те могат да се използват както при течности, така и при газове. Това е особено важно в химическата промишленост, където е необходимо точно отчитане на масов разход.

Конструкцията на сензора се състои от една или две вибриращи тръбички, изготвени от неръждаема стомана. Те имат U-образна форма, но могат да бъдат и от друг вид. За газове се използват по-тънки тръбички, отколкото за течности. В повечето конструкции тръбичката е закрепена в две точки и на нея ѝ се придава колебателно движение между тези две точки.

Принципът на действие на кориолисовите сензори се основава на това, че когато измервателната тръбичка извършва колебателно движение, в системата възниква допълнителна инерционна сила – така наречената сила на Кориолис (на името на френския физик Gaspard-Gustave de Coriolis). Под действието на тази сила тръбата започва да се огъва. Това огъване се отчита със сензори. Когато сензорът се състои от две паралелни тръбички, потокът се разделя на две на входа и се обединява на изхода им (фиг.7.12).



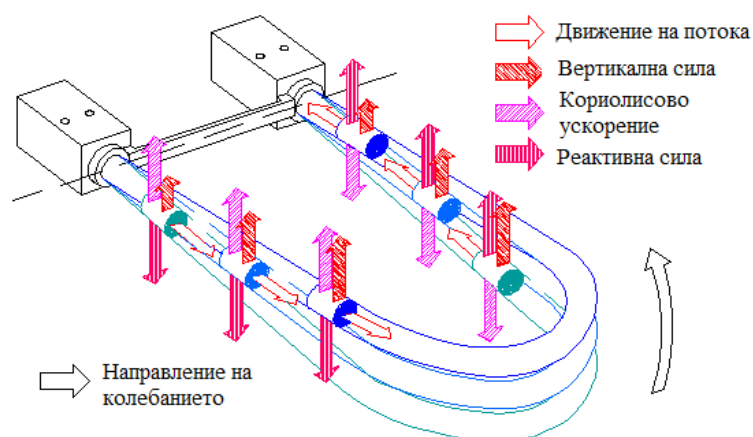
Фиг.7.12. Конструкция на кориолисов сензор за поток

Електромагнитен задвижващ механизъм принуждава тръбичките да вибрират. Електромагнитното задвижване се състои от бобина, съединена с едната тръбичка, и магнит, съединен с другата тръбичка. На бобината се подава променлив ток, който принуждава магнита периодично да се привлича и отблъсква. Тъй като магнитът и бобината са твърдо закрепени на отделните тръбички, то силата ще привлича и отблъсква тръбичките. Необходимо условие е наличието на променлив ток в бобината, тъй като силата трябва да променя посоката си. На тръбичките са монтирани два електромагнитни сензора, които могат да отчитат положението, скоростта

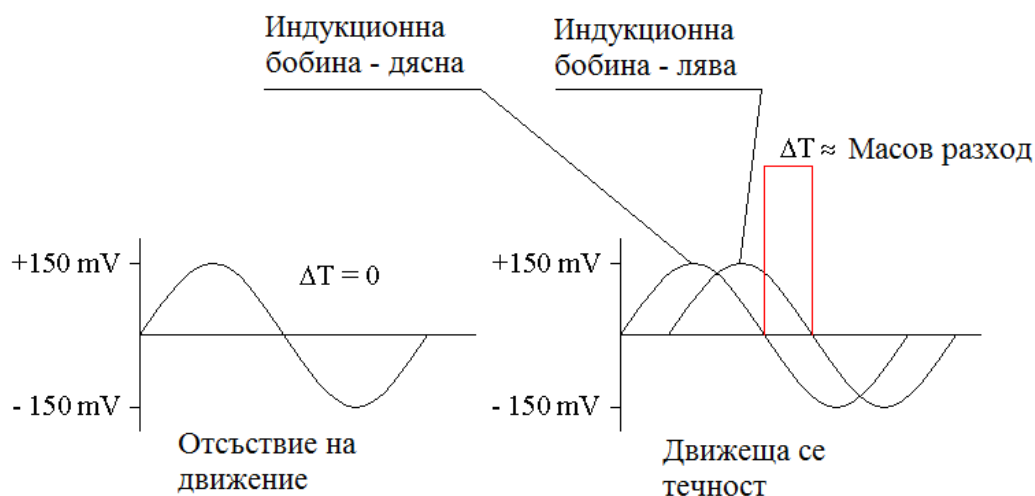
или ускорението на тръбичките. Синусоидалното напрежение, което се получава на изходите на сензорите, отразява движението на тръбичките.

Когато отсъства поток през тръбичките и те вибрират в резултат на електромагнитното задвижване, отсъства разлика в показанията на двата сензора. Ако има поток на течност и се създават вибрации в тръбичките, то силите на Кориолис създават вторична огъваща вибрация, която се проявява чрез неголяма разлика на фазите на относителните движения на тръбичките. Това се открива от сензорите в двете точки. Отклонение на тръбичките, предизвикано от силата на Кориолис, има само в този случай, когато едновременно присъства поток на течност и вибрация на тръбичките.

На фиг.7.13 е илюстрирана деформация на тръбичка под въздействие на кориолисовата сила при наличие на поток. Входната и изходната част на тръбичките се отклоняват в различни посоки.



Фиг.7.13. Деформация на тръбичка под въздействие на кориолисовата сила при наличие на поток



Фиг.7.14. Сигнали от двата сензора на кориолисовия сензор

На фиг.7.14 са показани синусоидалните сигнали от двата сензора. Когато няма разход, те съвпадат. При наличие на разход, между тях се получава фазова разлика, пропорционална на масовия разход.

Кориолосовите сили могат да се използват и за определяне на плътността на измерваната среда. За тази цел със сензорите се измерва и честотата на колебания на тръбичките. Резонансната честота на двутръбната конструкция зависи от геометрията, конструкционните материали и масата на цялата конструкция (масата на тръбичките и течността в тях). Масата на тръбичките е постоянна. Тъй като масата на течността е нейната плътност, умножена по обема ѝ, който също е постоянен, то честотата на вибрациите се обуславя от плътността на протичащата течност. Следователно плътността на течността може да бъде определена чрез измерване на резонансната честота на колебанията на тръбичките. Плътността на течността може да бъде определена и при отсъствие на разход, но тръбичките трябва да са запълнени и да вибрират. В резултат масовият разход и плътността се измерват едновременно, но при това независимо.

Предимствата на кориолисовите сензори за поток са: висока точност; нечувствителност към вибрации, температурни изменения и налягане на потока; измерване на поток на среди с голям вискозитет; посоката на потока не влияе на работата на сензора; висока надеждност.

Основният недостатък на кориолисовите сензори за поток е сравнително високата им цена.

На фиг.7.15 са показани кориолисови сензори за поток на фирмата Emerson от сериите Micro Motion ELITE и Micro Motion D.



Фиг.7.15. Кориолисови сензори за поток на фирмата Emerson от сериите Micro Motion ELITE и Micro Motion D

На фиг.7.16 е показан кориолисов сензор за поток SITRANS FCS400 на фирмата SIEMENS.



Фиг.7.16. Кориолисов сензор за поток SITRANS FCS400 на фирмата SIEMENS.

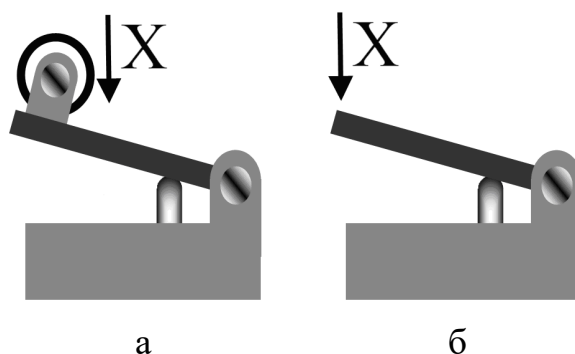
ГЛАВА 8. СЕНЗОРИ ЗА БЛИЗОСТ, РЕГИСТРИРАНЕ НА ОБЕКТИ И НИВО

8.1. Контактни сензори за регистриране на обекти

Като контактни сензори за наличие на обекти могат да се ползват механичните превключватели. Те генерират сигнал от типа – включено/изключено в резултат на механичен контакт с обекта. Когато натискът на обекта се премахне, превключвателят се връща в начално положение.

Превключвателите биват два вида – нормално отворени (NO) и нормално затворени (NC). NO превключвателите са с отворени контакти и при прилагане на механично въздействие се затварят и затварят електрическа верига, а при NC е обратното - те са със затворени контакти и при прилагането на механично въздействие се отварят и прекъсват електрическата верига.

Превключвателите могат да се използват за детекция на преминаваща част. Това може да стане с помощта на палец валяк (фиг.8.1а) или лост (фиг.8.1б).



Фиг.8.1. Превключватели

Контактните сензори намират широко приложение най-вече поради ниската си цена и защото не се влияят от формата, цвета и материала на обекта.

8.2. Сензори за близост

При тези сензори отсъства допир между тях и преместващия се обект. Изходният им сигнал е функция от взаимното положение между сензора и обекта. В зависимост от физическия принцип на действие, те могат да бъдат:

- индуктивни;
- вихровотокови;
- капацитивни
- на базата на ефекта на Хол.

Предимство на тези сензори е високата им надеждност поради това, че

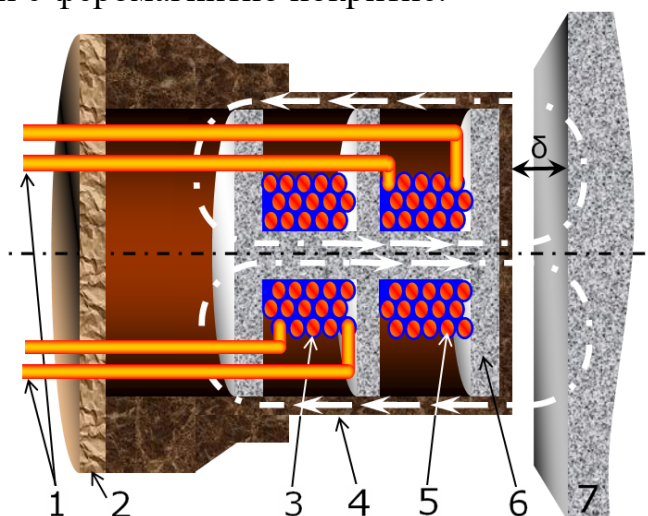
няма механични контакти между обекта и преобразувателя, няма триене, износване, шум и изменение на преходното съпротивление.

Като недостатък може да се отбележи нелинейната функция на преобразуване. Изходният сигнал зависи обикновено не само от разстоянието до обекта, но и от формата и материала му.

Тези сензори могат да работят в аналогов или дискретен режим. При аналогов режим изходният сигнал е непрекъсната функция от разстоянието между сензора и обекта. В дискретен режим съществуват две дискретни нива на изходния сигнал – високо и ниско. Високото изходно ниво съответства на наличието на обект, намиращ се под определено разстояние до сензора. Ниското ниво съответства на липса на обект или обектът е далеч от преобразувателя. Обикновено сензорите за близост се използват в дискретен режим на работа.

8.2.1. Индуктивни сензори с промяна на магнитното съпротивление

Този сензор (фиг.8.2) може да се разглежда като трансформатор, чиято първична намотка е намагнитващата намотка, а вторичната му намотка – измервателната намотка на сензора. Магнитният контур на този трансформатор включва преместващия се обект, който трябва да бъде феромагнитен или с феромагнитно покритие.



*1 – свързващи проводници за двете бобини; 2 – капак; 3 – намагнитваща бобина;
4 – корпус от немагнитен материал; 5 – измервателна бобина; 6 – каркас (основа); 7 – феромагнитен обект*

Фиг.8.2. Индуктивен сензор за близост с промяна на магнитното съпротивление

Разстоянието δ между обекта и сензора определя основно съпротивлението на магнитната верига и следователно – потока през вторичната намотка и напрежението на нейните изводи. Това напрежение се изменя нелинейно от δ

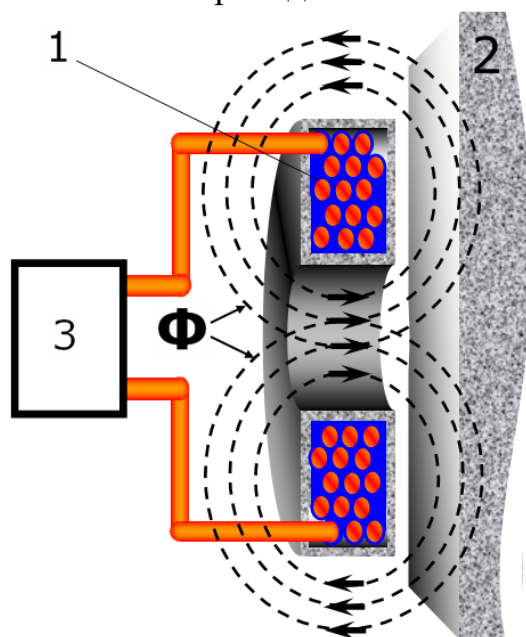
$$E = E_0 \frac{1}{(1 + a \delta)^2}, \quad (8.1)$$

където E_0 е началното напрежението при $\delta = 0$; коефициентът a зависи от магнитната проницаемост, формата и размерите на обекта.

Колкото обектът е по-близо до сензора, толкова напрежението в измервателната намотка е по-голямо.

8.2.2. Вихротокови сензори

Принципът на действие на вихротоковия сензор (фиг.8.3) се основава на изменението на активното съпротивление и индуктивността на бобина при приближаването към нея на проводим обект.



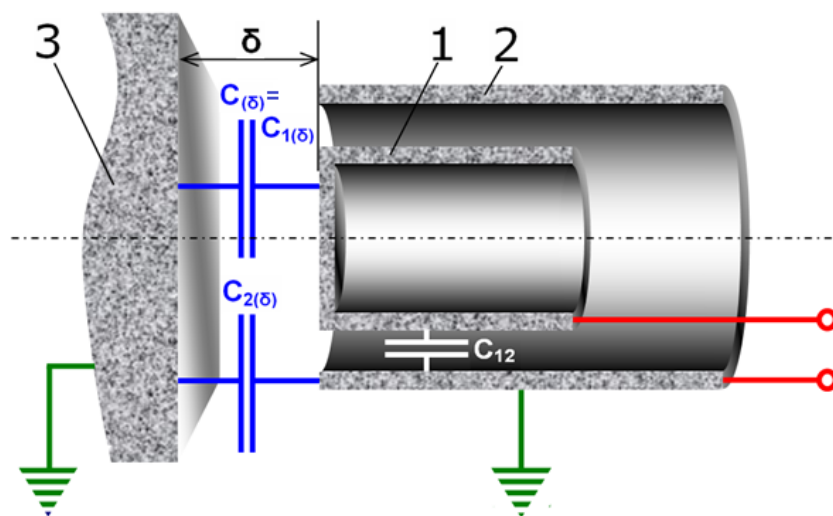
1 – бобина; 2 – обект от проводим материал; 3 – високочестотен генератор

Фиг.8.3. Вихротоков сензор за близост

Променливият ток, протичащ през бобината, създава магнитно поле, което пресича обекта и поражда вихрови токове в него. Те създават магнитно поле, което противодейства на причината за неговото появяване, т.е. магнитното поле на бобината намалява. При това се променят електрическите параметри на бобината: активното съпротивление се увеличава поради нарастването на загубите в проводящата среда, а индуктивността на бобината намалява.

8.2.3. Капацитивни сензори за близост

Капацитивните сензори за наличие на обект (фиг.8.4) използват свойството на приближаващия се обект да променя измервания от сензора капацитет.

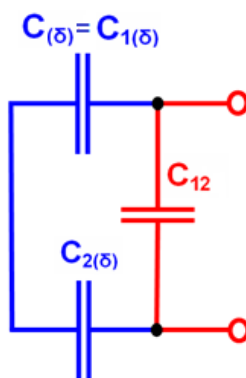


1 – цилиндрична част; 2 – коаксиална обвивка или тръба; 3 - обект

Фиг.8.4. Капацитивен сензор за близост

Еквивалентната електрическа схема е показана на фиг.8.5, а еквивалентният капацитет е

$$C_e = C_{12} + \frac{C(\delta) \cdot C_2(\delta)}{C(\delta) + C_2(\delta)} \quad (8.2)$$



Фиг.8.5. Еквивалентна електрическа схема на капацитивен сензор

Елементът 2 и обектът 3 обикновено се заземяват. При това

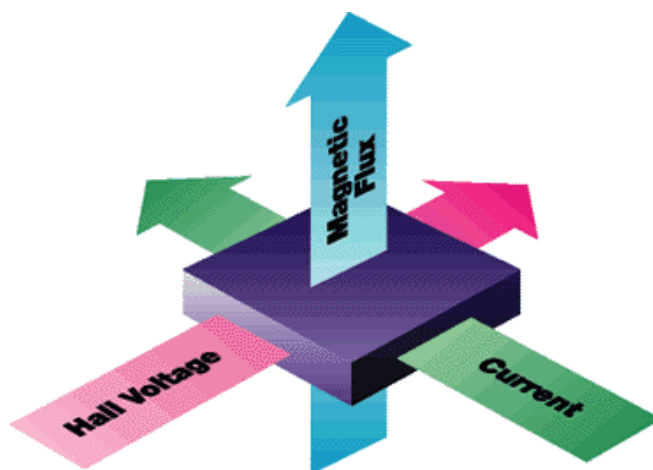
$$C_e = C_{12} + C(\delta), \quad (8.3)$$

т.е. еквивалентният капацитет зависи от разстоянието между сензора и обекта.

Преобразувателят обикновено се включва в мост за променлив ток.

8.2.4. Сензори за близост на базата на ефекта на Хол

Ефектът на Хол е галваномангнитен. Галваномангнитни са явления, които възникват при едновременно въздействие на електрическо и магнитно поле. Същността на ефекта на Хол се състои в следното: ако полупроводникова пластина, по която тече електрически ток, е поставена в магнитно поле, чиято магнитна индукция е перпендикулярна на плоскостта на пластината, то възниква електрично поле (потенциална разлика) в посока перпендикулярна на протичащия ток и магнитното поле (фиг.8.6). На всеки електрон, който се движи в пластината, ще действа сила на Лоренц. Под действие на тази сила електроните ще се отклоняват към една от надлъжните стени на пластината, в резултат на което тяхната концентрация ще се увеличава, а на противоположната стена ще намалява. Това води до пространствено разпределение на зарядите и до появата на разлика в потенциалите между стените и съответно - до възникване на напречно електрическо поле и напрежение, което се нарича напрежение на Хол. Натрупването на заряди на надлъжните стени на пластината ще продължи до тогава, докато действието на електрическото поле на Хол не уравни действието на силата на Лоренц.



Фиг.8.6. Схематично представяне на ефекта на Хол

Галваномангнитният ефект е силно изразен в полупроводници със собствена проводимост (само *n*- или *p*-тип) – германий, силиций, индиев арсенид, галиев арсенид, индиев антимонид и др. От тях се изготвят и сензорите на Хол.

Теоретично функцията на преобразуване, т.е. зависимостта на напрежението на Хол от магнитната индукция, при константен ток е линейна само за идеалния полупроводник с безкрайна дължина в посоката на протичане на тока и при ограничени стойности на магнитната индукция. Практически линейна може да се счита функцията на преобразуване на такъв сензор, при който отношението дължина към ширина е по-голямо от

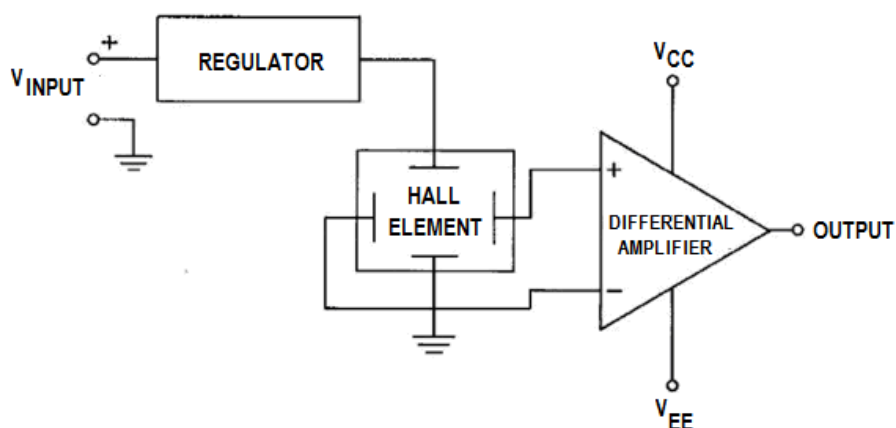
3 и горната граница на диапазона на преобразуване на магнитната индукция не превишава 5Т.

Напрежението на Хол може да бъде постоянно или променливо в зависимост от това, в какво поле е разположен сензорът и с какъв ток се захранва. Ако индукцията на магнитното поле и токът са постоянни, тогава и напрежението на Хол е постоянно. Ако индукцията на магнитното поле е постоянна, а токът променлив (или обратно), тогава напрежението на Хол ще бъде променливо с такава честота, каквато е и честотата на променливата входна величина.

При полупроводници с *p*-тип проводимост, при същата посока на тока и магнитното поле, полярността на напрежението на Хол ще бъде противоположна на полярността при полупроводник с *n*-тип проводимост.

Конструктивното изпълнение и геометричните размери на сензорите на Хол могат да бъдат различни. Преди всичко те се изготвят във форма на плоска четириъгълна пластина, на напречните стени на която се нанасят електроди, които служат за подаване на електрическия ток. Към центъра на надлъжните стени са закрепени така наречените холови електроди във вид на точкови контакти.

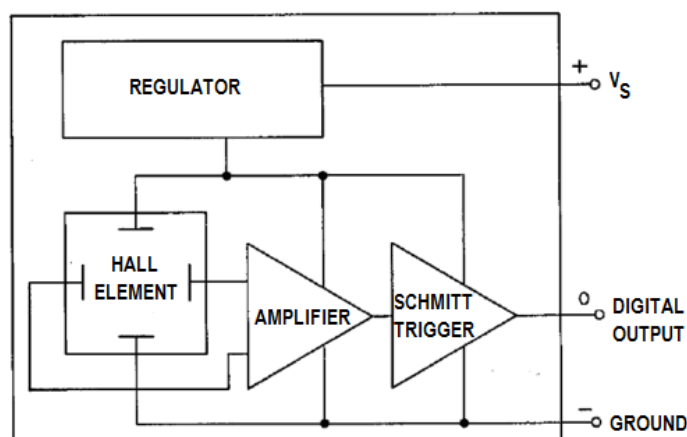
Сензорите на Хол могат да бъдат аналогови и цифрови. Аналоговите сензори на Хол (фиг.8.7) се характеризират с това, че към изхода на елемента на Хол директно е свързан операционен усилвател. Операционният усилвател трябва да бъде диференциален, за да може да увеличава само потенциалната разлика. Напрежението на изхода може да се разглежда като функция на тока и на магнитната индукция. Предназначението на регулатора е да поддържа големината на тока постоянна така, че сензорът на Хол да реагира само на промени в магнитното поле.



Фиг.8.7. Аналогов сензор на Хол

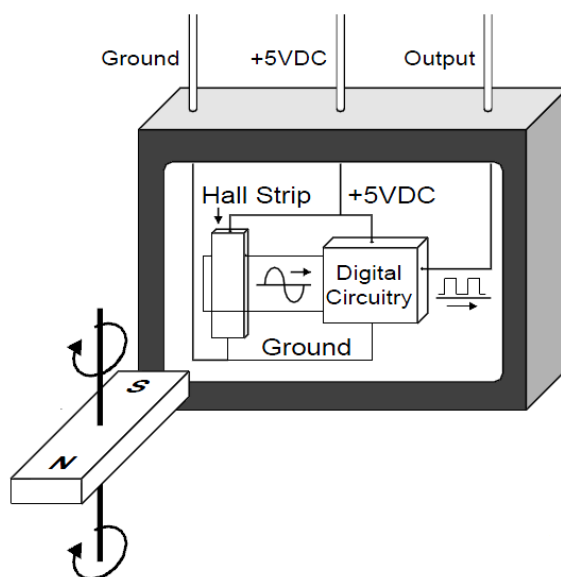
При цифровите сензори на Хол изходът е от дискретен тип (може да приема само две стойности ON или OFF). По своята конструкция те не се

различават значително от аналоговите (фиг.8.8). Допълнително след операционния усилвател е включен тригер на Шмит. Тригерът на Шмит се използва като компаратор, който сравнява изходното напрежение от диференциалния усилвател с референтно напрежение. Той се характеризира с хистерезис, който осигурява надеждно превключване във всяка посока и не допуска възникването на осцилации. Когато изходното напрежение от усилвателя превиши референтното, тригерът на Шмит променя състоянието си от OFF на ON (право превключване). Аналогично се изключва, когато изходното напрежение от операционния усилвател понижи своята стойност спрямо референтното напрежение.



Фиг.8.8. Цифров сензор на Хол

На фиг.8.9 е илюстрирана работата на сензора на Хол. През сензора протича константен ток. В непосредствена близост до сензора е въртящ се магнит. Променливото поле от магнита ще доведе до генериране на променливо напрежение на Хол.

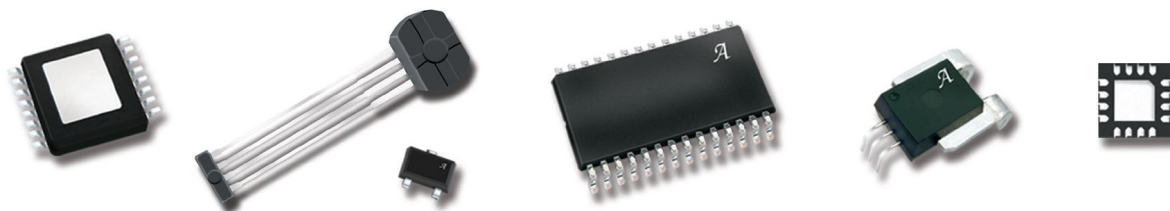


Фиг. 8.9. Работа на сензора на Хол

Основните производители на сензори на Хол са:

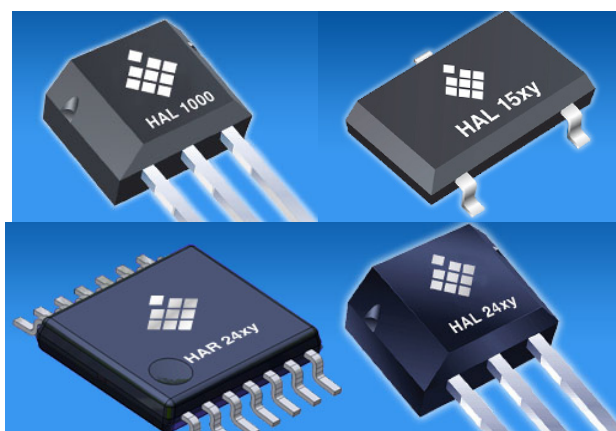
- TDK-Micronas GmbH (<http://www.micronas.com/>)
- Allegro MicroSystems LLC (<http://www.allegromicro.com/>)
- Infineon Technologies AG (<http://www.infineon.com/>).

На фиг.8.10 са показани сензори на Хол и интегрални схеми със сензори на Хол за различни приложения на фирмата Allegro MicroSystems LLC.



Фиг.8.10. Сензори на Хол на фирмата Allegro MicroSystems LLC

На фиг.8.11 са показани сензори на Хол и интегрални схеми със сензори на Хол за различни приложения на фирмата TDK-Micronas GmbH.



Фиг.8.11. Сензори на Хол на фирмата TDK-Micronas GmbH

8.3. Оптични сензори

Оптичните сензори включват двойка елементи: излъчвател (емитер) и приемник на светлина и реагират на промяната на интензитета на светлината, попадаща в този приемник. Съществува разнообразие от методи на наблюдение, по-голямата част от които са базирани на физическата ориентация на емитера спрямо приемника.

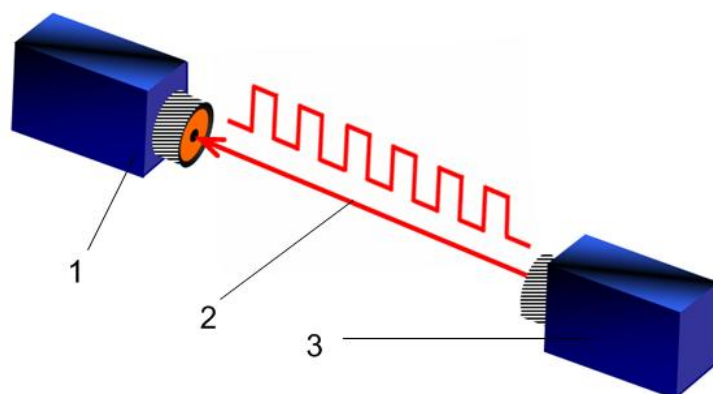
Повечето оптоелектронни сензори използват светодиоди - LED (Light Emitting Diode) като светлинен източник. Светодиодът представлява полупроводников елемент, електрически подобен на диод, с изключение на

това, че излъчва малко количество светлина, когато през него преминава ток в права посока. В приложения, в които наблюдаваният цвят е контрастен, изборът на цвят за светодиода може да бъде важен.

Оптоелектронният приемник обикновено използва един от трите чувствителни към светлина електронни елементи - фоторезистор, фотодиод и фототранзистор.

С изключение на инфрачервените видове, светодиодите произвеждат по-малко количество светлина в сравнение с флуоресцентните или тези с нажежаема жичка светлинни източници. Обикновено те излъчват по-малко количество светлина, отколкото нивото на заобикалящата ги среда. Модулацията на светлинния поток при сензорите осигурява нужната чувствителност, необходима за надеждното отчитане на толкова слаба светлина.

Светодиодите могат да бъдат включвани и изключвани (или модулирани) с висока скорост, обикновено с честота от няколко kHz (фиг.8.12). Тази модулация означава, че усилвателят на фототранзисторния приемник може да бъде настроен на честотата на модулация и да усилва само светлинни сигнали, пулсиращи с тази честота.



1 – приемник; 2 – модулирана светлина; 3 – излъчвател

Фиг.8.12. Оптичен сензор

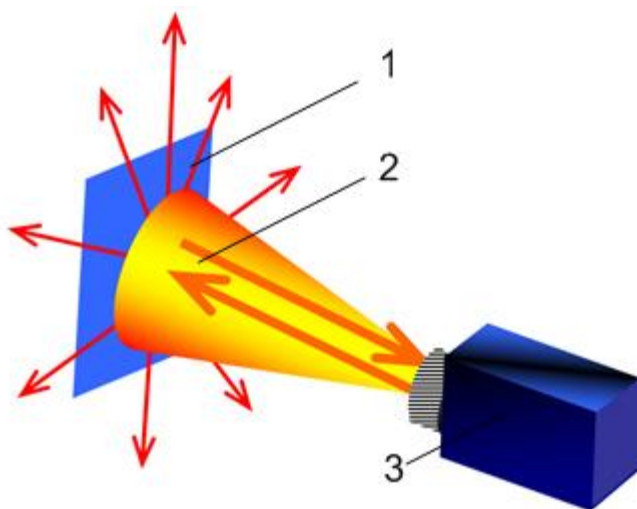
Модулираният приемник игнорира околната светлина и отговаря единствено на своя модулиран светлинен източник. В резултат на това модулираният приемник може да бъде усилен до много високо ниво. Въпреки това много ярки светлинни източници могат да попречат на нормалната работа на сензора.

Най-често в оптичните сензори се използват инфрачервени светодиоди като източници на светлина, но когато се налага да се разпознава цвят, се използват светодиоди, работещи във видимия спектър.

Могат да се различат три основни метода за регистриране на обекти от оптичните сензори - дифузен, бариерен и рефлекторен.

- дифузен метод

При сензорите, използващи този метод (фиг.8.13), обектът се регистрира, когато той премине пред сензора и отрази излъчената светлина обратно към приемника. В случая голямо влияние оказва цветът на обекта. Колкото по-светъл е обектът, разстоянието на което може да бъде регистриран този обект се увеличава. Излъчвателят и приемникът са разположени обикновено, но не винаги, в един и същи корпус.



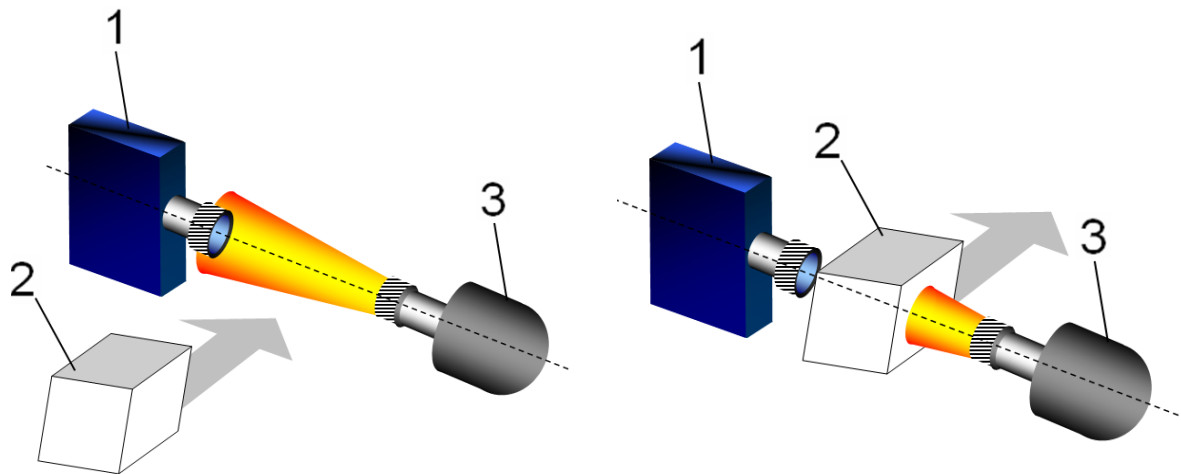
1 – обект; 2 – светлинен поток; 3 – сензор

Фиг.8.13. Дифузен метод за регистриране

При дифузния метод излъчената светлина достига повърхността на обекта под някакъв ъгъл. Светлината в този момент се разпръсква от повърхността на обекта в много посоки. Приемникът може да бъде под различен ъгъл и малка част от разпръснатата светлина ще достигне до него. От тази гледна точка дифузният метод е сравнително неефективен метод на регистриране. Също така при дифузния метод има огромно значение в каква степен повърхността на регистрирания обект отразява светлианта. Светла бяла повърхност ще бъде засечена на много по-голямо разстояние, отколкото матова черна повърхност. Обект с големи размери, успяващ да обхване целия поток на сензора, ще върне повече енергия към приемника, отколкото малък обект, който покрива потока само частично. Повечето дифузни сензори използват лещи, за да насочат излъчените светлинни лъчи, както и да фокусират повече от отразената светлина. Лещите при дифузните сензори позволяват увеличаването на разстоянието за регистриране, но също така увеличават значително ъгъла на монтаж в приложения, които засичат лъскави и гладки повърхности.

- бариерен метод на регистриране

При бариерния метод (фиг.8.14) приемникът и излъчвателят са в различни корпуси и се монтират един срещу друг, като помежду им има светлинен поток. Обектът се регистрира, когато премине между приемника и излъчвателя, блокирайки светлината, подавана от излъчвателя към приемника. Бариерният метод е най-ефикасният метод за регистриране наличието на обекти с помощта на оптични сензори.

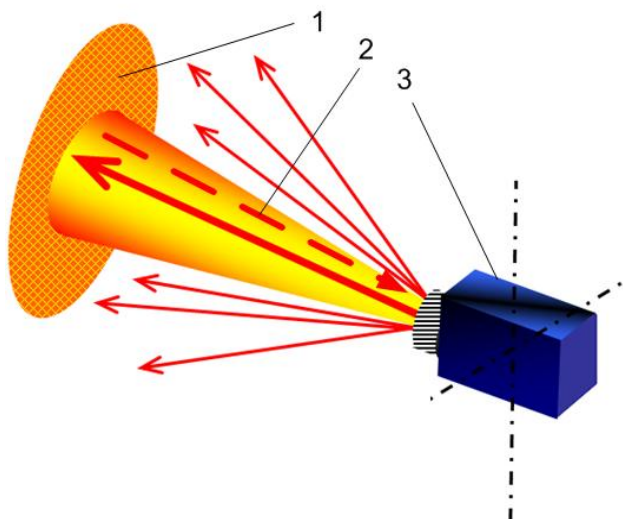


1 – приемник; 2 – обект; 3 – излъчвател

Фиг.8.14. Бариерен метод за регистриране

- рефлекторен метод на регистриране

При рефлекторния метод (фиг.8.15) се използва рефлектор, който отразява попадналата върху него светлина.



1 – рефлектор; 2 – светлинен поток; 3 – сензор

Фиг.8.15. Рефлекторен метод за регистриране

Светлинният поток се образува между излъчвателя, рефлектора и приемника. Той може да бъде инфрачервен или с видима червена светлина. Когато обектът пресече светлинния поток, интензитетът на отразената светлина, връщаща се обратно към сензора, намалява и обектът бива регистриран.

За да се отчитат лъскави обекти е необходимо сензорът да бъде монтиран по такъв начин, че ъгълът на падане на светлинния поток върху обекта да бъде различен от 90° . По този начин интензитетът на отразената светлина намалява.

Друг начин да се отчитат лъскави обекти е да се използват поляризиращи филтри. Пред излъчвателя и приемника на светлина се поставят филтри, чиито равнини на поляризация са завъртени на 90° . Излъчената поляризирана светлина се отразява от рефлектора, който същевременно променя и нейната равнина на поляризация, така че да може да премине през филтъра на приемника. Ако излъчената светлина се отрази от обект, то нейната равнина на поляризация не се променя и филтърът на приемника не пропуска тази светлина, което служи за отчитане на наличието на обект.

8.4. Ултразвукови сензори

Ултразвуковите сензори се използват за регистриране на обекти независимо от материала и цвета, а също и за измерване на ниво. Те се използват преди всичко в среди с високо съдържание на прах и в тези случаи, когато вследствие на високата степен на замърсяване е невъзможно да се използват оптични сензори.

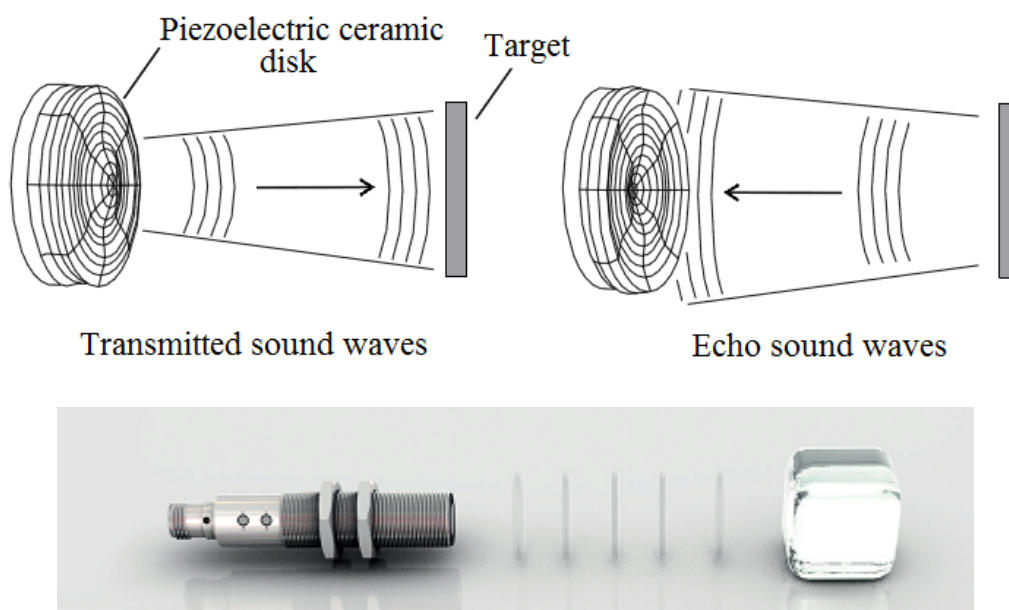
Повечето ултразвукови сензори работят в честотен диапазон над 20 kHz до 250 kHz. Ултразвуковите вълни могат да бъдат фокусирани също както светлинните. Затова за ултразвук са в сила законите за отразяване на светлината, а типовете ултразвукови сензори съвпадат с типовете оптични сензори (дифузни, бариерни и рефлекторни).

За получаване на ултразвукови колебания могат да се използват магнитострикционният ефект и пиезоефектът. По-голямо приложение при ултразвуковите сензори намира пиезоефектът. Ултразвуковите излъчватели преобразуват електрическия сигнал в механични колебания, а приемниците преобразуват механичните колебания в електрически сигнал.

Ултразвуковите сензори могат да бъдат с цифров или аналогов изход. Първите регистрират наличието или отсъствието на обект, а вторите определят разстоянието до него.

Дифузното отражение е най-разпространеният принцип, използван в ултразвуковите сензори. Ултразвуковата вълна, отразена от обекта, се връща към сензора като ехо. Ултразвуковите измервания имат две фази (фиг.8.16). Първата – емисия на ултразвуковия сигнал от преобразувателя в

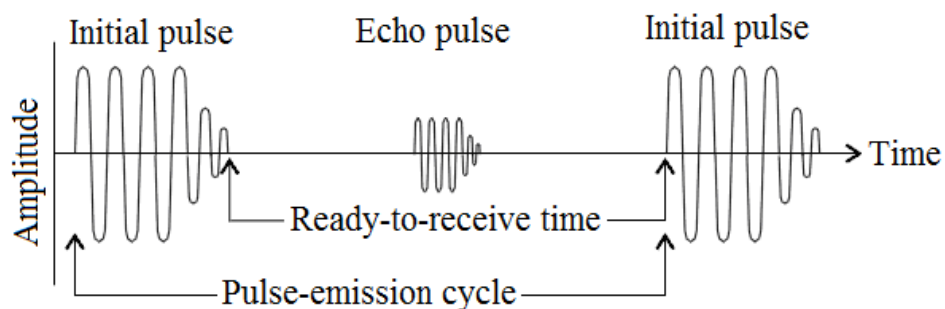
посока към обекта, а втората – емисия на ултразвуковия сигнал от открития обект в посока към преобразувателя.



Фиг.8.16. Дифузно отражение при ултразвуковите сензори

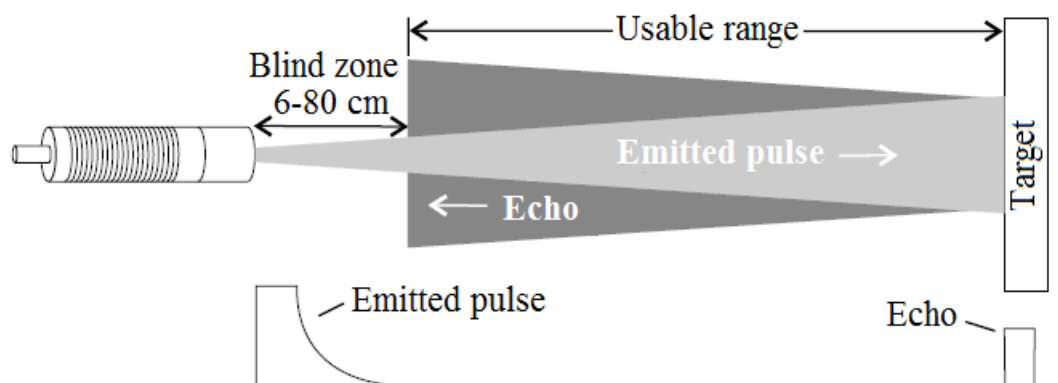
В дифузните сензори двете функции се изпълняват от един и същи пиезоелектрически преобразувател. Чувствителността на сензора е толкова по-голяма, колкото по-голяма е плътността на обекта. При по-голяма плътност се отразява по-голяма част от звуковата вълна.

В тези сензори се генерират периодични ултразвукови импулси (фиг.8.17). Тези импулси периодично се повтарят с честота няколко десетки херца. Времето на очакване на връщането на ехо сигнала започва след като импулсът е изпратен и продължава до момента на изпращане на следващия импулс. Чрез измерване на времето на връщане на ехо сигнала до сензора може да се определи разстоянието до обекта. Наличието на ехо сигнал означава откриване на обект в работния диапазон на сензора. В дифузните ултразвукови сензори се използват специални управляеми преобразуватели, които генерират и приемат ултразвуковите вълни.



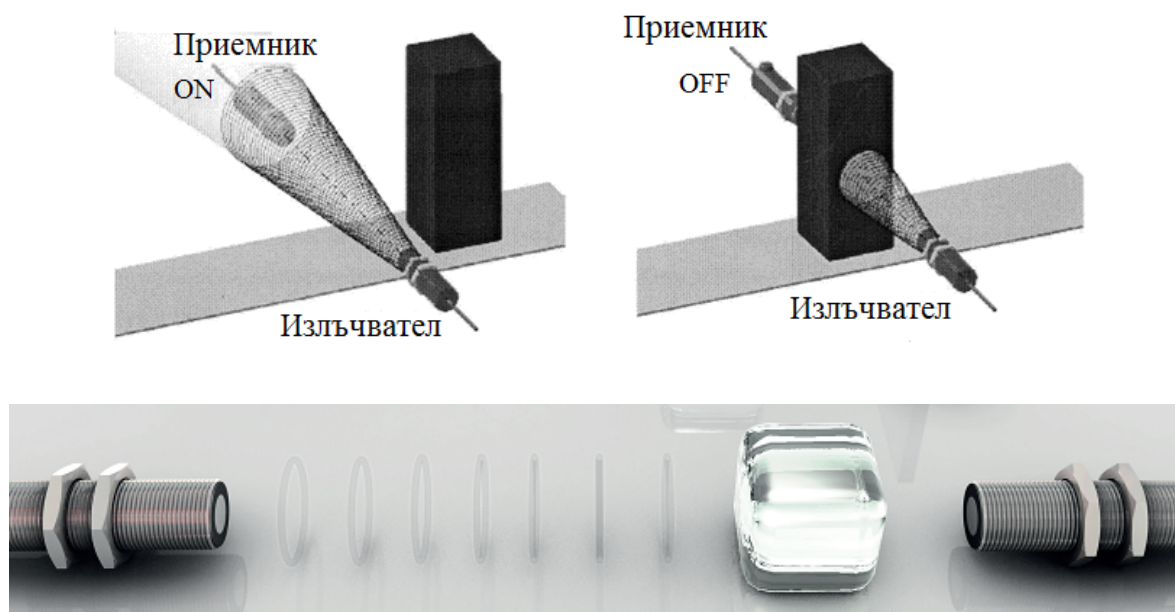
Фиг.8.17. Принцип на измерване при дифузните ултразвукови сензори

В предната част на сензора се намира мъртвата (сляпата) зона, където обектите не се детектират или тяхното откриване е малко вероятно (фиг.8.18). Размерът на мъртвата зона зависи от диапазона и размера на сензора и е в границите от 6 cm до 80 cm. Мъртвата зона се проявява, когато преобразувателят работи като генератор и не може да приеме ехо сигнала от близко разположен обект. Преобразувателят е готов да приема ехо сигнала не по-рано от завършването на излъчването на ултразвуковия импулс.



Фиг. 8.18. Мъртва зона при ултразвуковите сензори

В бариерните сензори ултразвуковият преобразувател, генериращ ултразвуковата вълна в посока на приемника (излъчвател), е разположен в отделен корпус. Обектът, намиращ се на пътя на ултразвуковата вълна, я прекъсва и се превключва изходът на сензора-приемник (фиг. 8.19).



Фиг. 8.19. Бариерни ултразвукови сензори

При бариерните ултразвукови сензори, за разлика от дифузните и рефлекторните, преобразувателят генерира непрекъсната ултразвукова вълна, като при това отсъства мъртва зона.

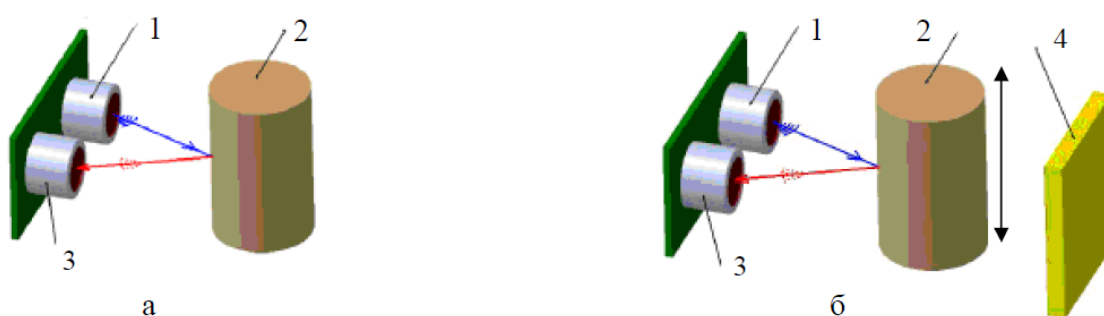
Принципът на работа на рефлекторните ултразвукови сензори (фиг.8.20) се състои в разликата между времето на връщане на ултразвуковата вълна, отразена от обекта, и времето на връщане на ултразвуковата вълна от отражателя. Като отражател може да бъде всяка плоска и твърда повърхност. Ултразвуковата вълна, отразена от обекта, трябва да се върне към сензора по-рано от вълната от отражателя. В този случай състоянието на изхода на сензора се превключва.



Фиг.8.20. Рефлекторен ултразвуков сензор

Този тип сензори са най-ефективни за регистриране на обекти, които добре поглъщат ултразвука (памук, текстилни материали и др.), а също за откриване на обекти с повърхности, които не са перпендикулярни на оста на сензора.

Сензорите с два преобразувателя в един корпус (фиг.8.21) могат да работят в режим на дифузия и в режим на отражение с рефлектор. Единият от преобразувателите работи като излъчвател, а другият – като приемник на ултразвуковата вълна.



1 – излъчвател; 2 – обект; 3 – приемник; 4 – рефлектор

Фиг.8.21. Сензор с два преобразувателя: а – дифузен; б - рефлекторен

Това позволява да се откриват обекти, които са разположени много близо до сензора, тъй като приемникът не трябва да чака, докато импулсът бъде генериран от излъчвателя. Излъчвателят и приемникът в този случай трябва да бъдат синхронизирани.

На фиг.8.22 са представени различни типове ултразвукови сензори.

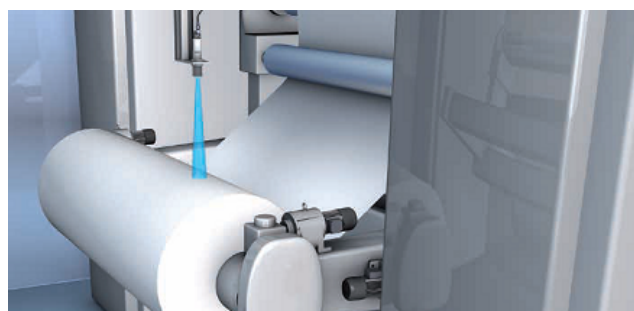


Фиг.8.22. Ултразвукови сензори

Приложения на ултразвуковите сензори



Контрол за наличие на обект



Определяне на диаметъра на рулон



Разпознаване и бързо преброяване на обекти, например бутилки в линии за пълнене



Измерване на ниво на течности и насипни материали



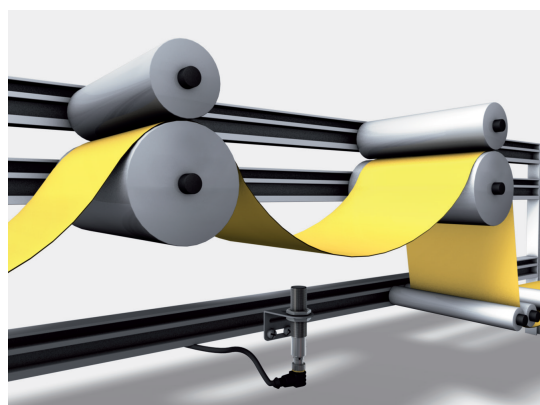
Мониторинг на нивото на пълнене
в съдове



Контрол за наличието на материал
върху транспортна лента



Позициониране на работи



Контрол на провисване



Контрол на качеството



Контрол на запълване с насипен
материал

8.5. Радарни сензори

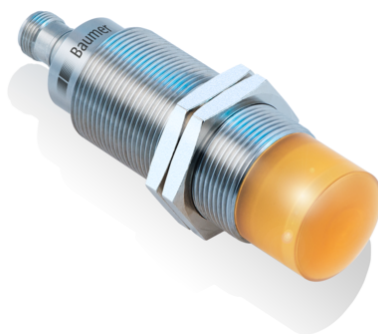
Принципът на действие на радарните сензори (Radar Sensor), е подобен на този на ултразвуковите, но се излъчва електромагнитна вълна с висока честота в гигагерцовия диапазон. Вълната се отразява достатъчно добре от твърди, полутвърди и течни обекти, разстоянието до които може да бъде измервано. С увеличаване на честотата нараства точността на измерване, но и поглъщането от въздуха е по-силно, което означава по-малък обхват или необходимост от по-голяма мощност на излъчване. Последната не надхвърля няколко десети от mW, поради което радарните сензори са напълно безопасни за здравето (излъчваната от антената на един GSM мощност е няколко W).

Според вида на излъчваната вълна, съществуват два вида радарни сензори. Импулсните (Pulse Radar) излъчват по посока на обекта пакети от синусоидални сигнали с продължителност под 1 ns. Вторият вид са радарни сензори с честотна модулация (Frequency-Modulated Continuous Wave – FMCW), които излъчват синусоидална електромагнитна вълна с честота, линейно изменяща се във времето. Обикновено FMCW работят в обхвата на честотите 9 GHz и 10 GHz или 24 GHz и 26 GHz, имат значително по-голяма мощност на излъчване и по-сложен електронен блок за обработка на сигнала. В съвременните разновидности сигналът се излъчва периодично и изчисляването на разстоянието се извършва в паузите. Това намалява мощността, но забавя измерването и налага ограничения. С радарни сензори се измерват разстояния до (или нивото на) различни течности (горещи, студени, химически активни), втечнени газове, тестообразни субстанции, насипни материали и твърди тела.

Отражението от даден обект е много важно за големината на получения сигнал. Като цяло, проводящите материали и обекти с висока диелектрична проникваемост са добри рефлектори, докато много диелектрици абсорбират енергия и отразяват много малко от нея. Най-добрият обект за микровълнов детектор е гладката плоска проводяща плоча, разположена нормално към детектора.

Материали с ниска диелектрична проникваемост, например синтетични материали, водят до по-малко отразяване на излъчения сигнал, отколкото материали с висока диелектрична проникваемост. Пластмасите и керамиката са доста пропускливи и могат да се използват като прозорци в микровълновите детектори. Влиянията на замърсяванията и праховите частици върху измерването са малки.

В много случаи радарните сензори могат да заменят детекторите за наличие на обекти и движение на основата на инфрачервено лъчение (пироелектрични сензори) в устройства за отваряне на врати и контрол на трафика. Типичен пример е използването на микровълнов сензор КМУ 24 (Siemens) за регистриране на движещи се обекти.



Фиг. 8.23. Радарен сензор за измерване на разстояние на фирмата Baumer

На фиг.8.23 е показан радарен сензор за измерване на разстояние RR30.DAMO-UGPR.9VF, предлаган от фирмата Baumer. Сензорът може да измерва разстояние в диапазона 0,5...40 m.

8.6. Сензори за ниво

Съществуват два типа измервания на ниво:

- непрекъснато измерване на ниво;
- детектиране на гранични стойности на ниво.

Непрекъснатото измерване на нивото дава информация за действителното ниво в даден момент. Детектирането на гранични нива предоставя информация, дали е достигнато дадено критично ниво.

Сензорите за ниво биват контактни и безконтактни. Предимствата на безконтактните сензори са свързани с отсъствието на контакт между средата, чието ниво се измерва, и чувствителния елемент и способността да работят с различни среди. Контактните сензори не могат да бъдат използвани за взривоопасни течности и не винаги имат възможност да работят в агресивни среди.

8.6.1. Детектиране на гранични стойности на ниво

Сензорите за детектиране на гранични стойности на ниво работят като превключватели. На изхода им се извежда логически сигнал, когато е достигнато определено ниво.

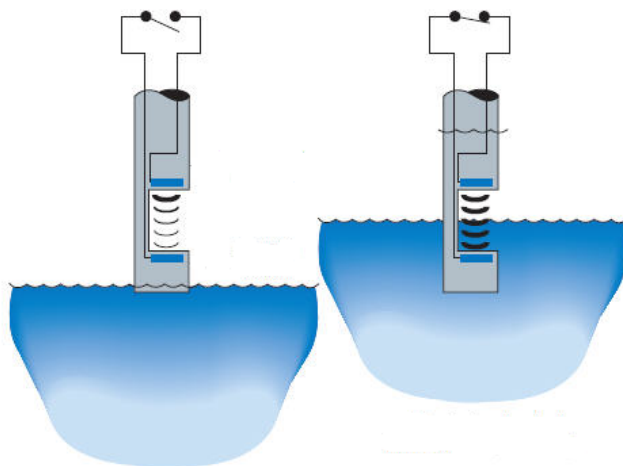
- ***Капацитивен превключвател за ниво***

Чувствителният елемент на тези сензори е във вид на електроди на кондензатор. Всеки път, когато течността или материалът достига мястото, където е инсталиран сензорът, стойността на сензорния капацитет се изменя и се активира превключвателят. Този сензор може да се използва за измерване на граничните нива на течности и насипни материали от различен вид.

- ***Ултразвуков превключвател***

При ултразвуковите сензори се измерва времето за получаване на отразения сигнал и когато това време достигне зададена гранична стойност, се генерира изходен логически сигнал.

Друг тип ултразвуков превключвател на ниво е показан на фиг.8.24. Ултразвуковият сигнал се генерира от излъчвател и се приема от приемник. Когато се предава чрез въздуха, сигналът достига до приемника със значително по-малка амплитуда. Когато е налице течност, получаваният ултразвуков сигнал в приемника е с по-голяма амплитуда. При получаване на по-голям сигнал от приемника, електронната схема, към която той е свързан, генерира сигнал, който показва наличието на течност.



Фиг.8.24. Ултразвуков превключвател за ниво на течност

- *Кондуктивен сензор*

Кондуктивните сензори се състоят от електроди, поставени в резервоара, които измерват съпротивлението на материал. Ако резервоарът е метален, той може да служи като общ електрод и в този случай сензорът се състои само от един електрод.

- *Поплавков превключвател*

Поради по-голямата плътност на течността, поплавъкът се намира върху повърхността ѝ. Поплавъкът може да има постоянен магнит, който създава достатъчно силно магнитно поле, за да активира рийд контакт, разположен на нивото, което ще се детектира. С помощта на два поплавъка с различна плавателност е възможно да се измери съответното ниво на несмесими течности като вода и масло в резервоар за съхранение.

- *Превключватели за ниво с оптично влакно*

Функционирането на тези ключове се основава на промяната на характеристиките на оптичното влакно, когато нивото на течност с подходящ индекс на пречупване достигне края на влакното, потопено в течността.

8.6.2. Непрекъснато измерване на нивото

Сензорът за непрекъснато измерване на ниво осигурява сигнал, пропорционален на нивото на течността или материала в резервоара.

- *Капацитивни сензори за ниво*

Капацитивните сензори за измерване на ниво са подходящи за измерване на ниво на различни течности като вода, нефт, бензин, основи, киселини и др. Сравнително широкото им използване в практиката се дължи на лесното обслужване, липсата на подвижни елементи, поради

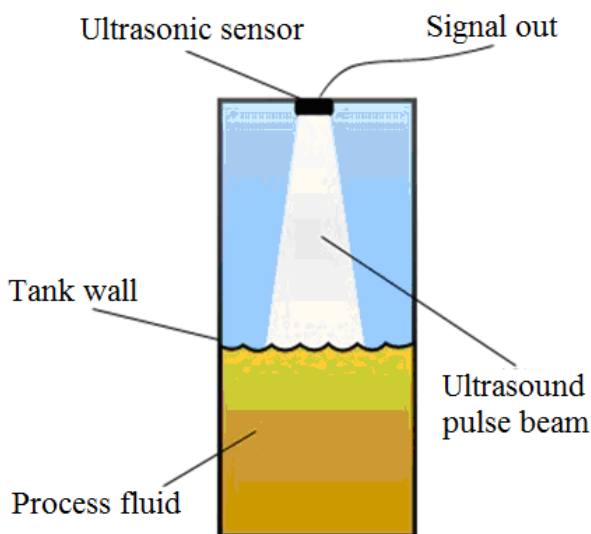
което се считат за много надеждни и с дълъг експлоатационен срок, имат удобен монтаж на първичния преобразувател, възможност да бъдат използвани в широк температурен диапазон и налягания до 6 МРа.

Обикновено конструкцията на кондензаторните преобразуватели е различна в зависимост от това, дали течността е електропроводима или не. Разликата основно е в изолирането на единия от електродите на нивомера при използването му за измерване на нивото на електропроводими течности. Съответно, при неелектропроводими течности електродите на преобразователите не са изолирани. Самите електроди могат да бъдат във вид на плоски пластини или с цилиндрична форма. Конструкцията им е показана в раздел 3.4.3. Като втори електрод може да се използва и стената на съда, в случай, че той е метален. Неблагоприятно влияние върху работата на капацитивните нивомери оказва активното съпротивление на сензора, поради което в схемата на нивомера обикновено се включва фазов детектор.

Капацитивните нивомери не се считат за подходящи за измерване на нивото на вискозни, летливи, токсични, утаяващи се и кристализиращи течности. Като техни недостатъци се посочват и високата чувствителност по отношение на изменение на електрическите свойства на течността и изменението на капацитета на кабела, който свързва първичния преобразувател с измервателния уред и необходимостта от потапяне в течността.

- *Ултразвукови сензори за ниво*

Този тип безконтактни сензори за ниво се използва за непрекъснато измерване и измерване на граничното ниво на течности и насипни материали (фиг.8.25).



Фиг.8.25. Ултразвуково измерване на ниво

Излъчваният от сензора ултразвуков сигнал се отразява от контролираната среда и по времето за закъснение на отразения сигнал по отношение на излъчения се оценява нивото. Ултразвуковите сензори позволяват да се извършват измервания в запрашени и задимени среди, а също - при условия с високо ниво на шум.

Освен това тези сензори позволяват да се измерват разстояния до обекти с различна форма, цвят и размер, а също - от различни материали. Работната честота на ултразвуковите сензори е около 40 kHz. Диапазонът на измерване обикновено е до 20 m, а препоръчителната температура на околната среда е от 0°C до 30°C. Правилното инсталиране на ултразвуковите сензори за ниво позволява да се премахнат смущенията вследствие на отразяването на сигнала от стените на съда, от нагревателите, охладители или бъркалки в резервоара. Към предимствата могат да се отбележат още компактните размери, липсата на подвижни части и непретенциозното им обслужване.

Основните недостатъци на ултразвуковите сензори са свързани с това, че те не могат да се използват в приложения с висока турбулентност или в приложения, които могат да имат парни емисии, пяна или голяма разлика в концентрацията на технологичния материал. Турбулентността и пяната създават проблеми за ултразвуковата вълна за правилно отразяване обратно към сензора, докато парата и изпарението поглъщат акустичния сигнал.

Ултразвуковите методи осигуряват измерване независимо от промените в плътността и диелектричните свойства на течността. Ултразвуковите сензори могат да работят с чисти, лепкави и агресивни флуиди при наличие на твърди частици, както и с някои суспензии и аерирани течности. Ултразвуковите сензори са подходящи да се използват при агресивни и абразивни вещества. Намират приложение и когато електрическите параметри на веществото се променят, а също така и за измерване на нивото в резервоари с взривоопасни вещества.

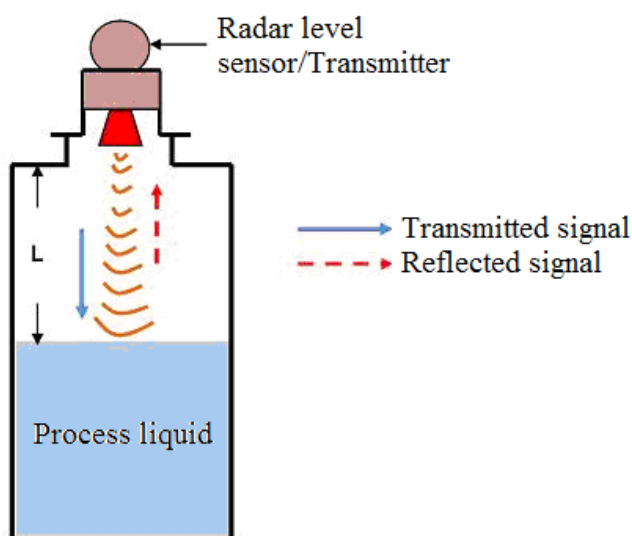


Фиг. 8.26. Ултразвуков сензор за ниво Rosemount 3100 на фирмата Emerson

На фиг.8.26 е показан ултразвуков сензор за ниво Rosemount 3100 на фирмата Emerson.

- *Радарни сензори за ниво*

Принципът на действие на радарните сензори за ниво се основава на излъчване на вълни в микровълновия диапазон и отражението им от повърхността на течността или насипното вещество (фиг.8.27). При това се фиксира закъснението на отразения сигнал по отношение на сигнала от източника. Така по големината на закъснението може да се определи нивото на течността. За определяне на закъснението се използва линейна модулация на честотата на източника. Ако честотата на изходния сигнал се изменя по линеен закон (например, непрекъснато нараства), то отразеният сигнал, имащ отместване във времето спрямо изходния, ще има и по-ниска честота. По големината на честотното отместване може еднозначно да се съди за големината на времето на закъснение между двата сигнала, а следователно - и за разстоянието до повърхността на течността.



Фиг.8.27. Измерване на ниво чрез радарен сензор

В сравнение с други сензори за ниво, радарните сензори имат редица предимства: голям работен диапазон (до няколко десетки метра), непрекъснато измерване на нивото на течността при тежки условия (високо налягане и температура), устойчивост към замърсявания, образуване на пяна и изпарение от контролирана повърхност, висока точност на измерване (до ± 1 mm). Основен недостатък на този тип сензори е тяхната висока цена.

Най-широко приложение радарните сензори за ниво намират в металургията, при производството на стомана и в енергетиката. Високата точност и надеждност на сензорите от този тип позволява те да се използват в автоматизирани системи за управление на сложни обекти. На

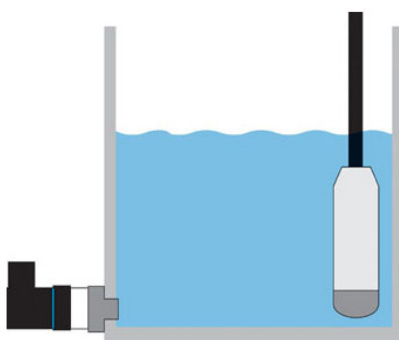
фиг.8.28 са показани радарни сензори за ниво Rosemount 5408 на фирмата Emerson. Измервателният диапазон на сензорите е 40 m с точност ± 2 mm.



Фиг.8.28. Радарни сензори за ниво Rosemount 5408 на фирмата Emerson

- *Хидростатични сензори за ниво*

Налягането на течност или твърдо вещество е пропорционално на нивото им. Хидростатичните сензори за ниво измерват налягането на течността на дъното на резервоара. Предлагат се различни типове сензори, които могат да се поставят в резервоарите и да се закрепват за дъното им или да се монтират отвън чрез фланец (фиг.8.29).



Фиг.8.29. Разположение на хидростатичните сензори за ниво в резервоара

Те са лесни за монтиране и се характеризират с висока надеждност. Използват се за измерване на ниво на вода, горива, смазочни материали, химикали и други продукти. Могат да се използват в потенциално експлозивни среди. На фиг.8.30 са показани хидростатични сензори за ниво на фирмата Emerson.

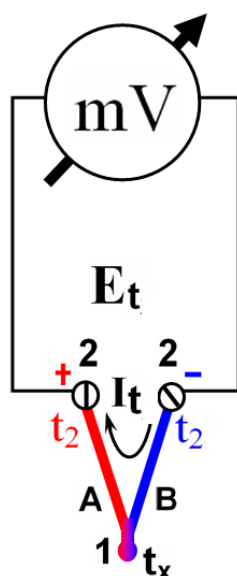


Фиг.8.30. Хидростатични сензори за ниво на фирмата Emerson

ГЛАВА 9. ТЕМПЕРАТУРНИ СЕНЗОРИ

9.1. Термоелектрически сензори

Към тях се отнасят термодвойките (фиг.9.1). Те се състоят от два разнородни проводника А и В, наречени термоелектроди, заварени в една обща точка – гореща точка. Прието е заварените краища да се наричат топли, а свободните – студени (неработни).



1 – гореща точка; 2 – студени краища

Фиг.9.1. Термодвойка

Принципът им на действие се основава на ефекта на Зеебек. Ако горещата точка се постави при температура $t_1 = t_x$, а студените краища се намират при температура t_2 , като $t_1 > t_2$, то между двата свободни края възниква термоелектродвижещо напрежение (т.е.д.н.) E_t , което е функция на разликата от двете температури, т.е.

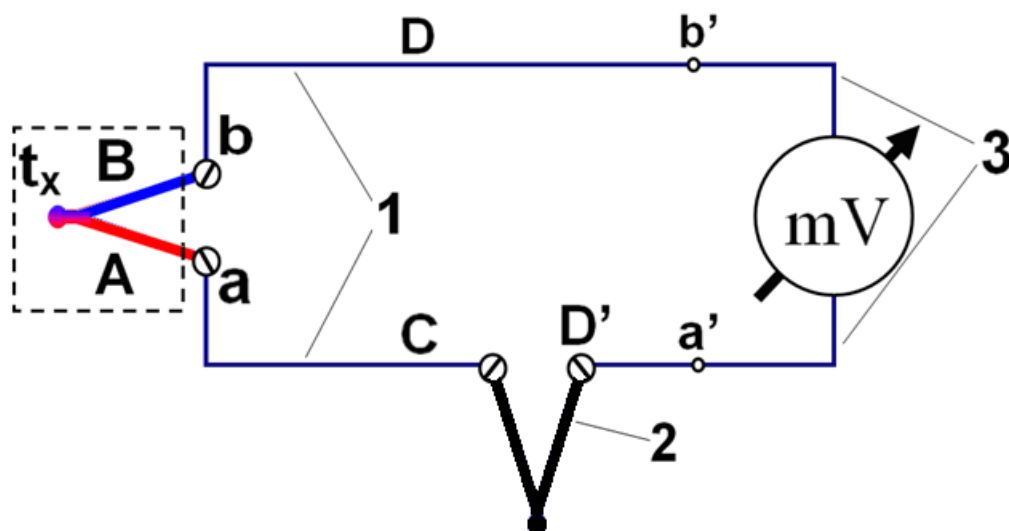
$$E_t = f(t_1 - t_2) \quad (9.1)$$

Този ефект се нарича още термоелектрически ефект. Като се поддържа $t_2 = \text{const}$, се получава възможност за измерване на температури, т.е. $E_t = f_1(t_1)$. Принципно свързване за измерване на температура е показано на фиг.9.1.

Най-добрият начин е студените краища да се държат при референтната температура 0°C или да се коригира генерираното напрежение до това, което съответства на 0°C . Това се нарича компенсация на студените краища.

При измерване на температури и други неелектрически величини в практиката обикновено не може да се приложи схемата от фиг.9.1. Тъй като

разстоянията до обекта на измерване са големи, а термоелектродите са от скъпи материали и не е икономично да бъдат дълги, то в такива случаи се използват междинно свързващи проводници – удължителни проводници (електроди) C и D (фиг.9.2)



1 – удължителни проводници; 2 – компенсираща термодвойка; 3 – медни проводници

Фиг.9.2. Схема на свързване на термодвойка с удължителни проводници

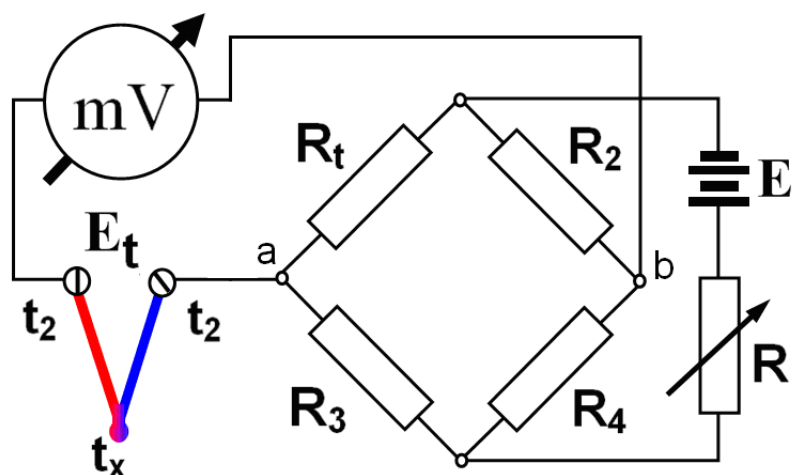
За да не предизвикват тези електроди допълнителна грешка при изменението на околната температура, то те трябва да са термоидентични с електродите A и B (A с C и B с D и D'). Термоидентични се наричат тези метали, които в контакт един с друг не образуват термодвойка от 0 до 100°C.

Тъй като основната част от грешките при измерване с термодвойки се обуславя от непостоянството на температурата на студените краища, то в лабораторни условия студените краища се термостатират, като се поставят в топящ се лед или в термостат. В производствени условия студените краища могат да се термостатират или като се поставят достатъчно дълбоко в земята, като се поместят в масивна кутия с добра топлоизолация, или като се използват компенсиращи схеми.

В схемата от фиг.9.2 се използва компенсираща термодвойка.

Голямо приложение за компенсиране на допълнителната грешка от промяната на температурата на студените краища намира схемата от фиг.9.3 посредством мост с термочувствителен резистор R_t .

Използва се и софтуерна компенсация на влиянието на температурата на студените краища. При нея с помощта на термочувствителен сензор се измерва температурата на студените краища и тази информация се използва за корекция при определянето на неизвестната температура.



Фиг.9.3. Схема на свързване на термодвойка с компенсация на температурата на студените краища посредством мост с термочувствителен резистор

Термодвойките имат нелинейна функция на преобразуване, която в общия случай има следния вид

$$E_t = At + Bt^2 + Ct^3. \quad (9.2)$$

Тук $t = t_1 - t_2$ е температурната разлика между топлите и студените краища; A , B и C са константи, които зависят от материала на термоелектродите. В практиката за промишлените термодвойки се дават таблични данни за т.е.д.н. E_t през 1°C при $t_2 = t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Недостатък на термодвойките при измерване на променливи температури е голямата им топлинна инертност – от десетки секунди до 10 минути.

В табл.9.1 е приведена информация за някои от най-използваните типове термодвойки.

Таблица 9.1. Информация за най-често използваните типове термодвойки

Тип	Материал на термоелектродите	Работен диапазон, $^\circ\text{C}$
T	мед – константан (сплав мед-никел)	-200...370 $^\circ\text{C}$
J	желязо – константан	0...760 $^\circ\text{C}$
E	хромел (сплав никел-хром) – константан	-200...900 $^\circ\text{C}$
K	хромел – алумел (сплав никел-манган-алуминий-силиций)	-200...1260 $^\circ\text{C}$
R и S	платинородий (сплав платина и родий) – платина	0...1480 $^\circ\text{C}$
B	платинородий (30%) – платинородий (6%)	870...1700 $^\circ\text{C}$

Термодвойките *тип Т* са устойчиви към корозия, затова могат да се използват за работа във влажна атмосфера. Приложими са за измерване на отрицателни температури. При работа в агресивна въздушна среда тяхната горна граница на работния диапазон е ограничен до 370°C, което е свързано с окисляване на медния електрод. В други условия на околната среда тези термодвойки могат да се използват и при по-високи температури.

Термодвойките *тип J* са подходящи за работа във вакуум, а също в различни среди – инертни, окислителни и редуccionни. Работният им температурен диапазон е в интервала 0...760°C. При температура 540°C започва бърз процес на окисляване на железните термоелементи. Ако е необходимо термодвойките да работят дълго време в условията на високи температури, за тяхното изготвяне е нужно да се използват проводници с голямо напречно сечение. Този тип термодвойки не се препоръчва да се използват под 0°C поради тяхната крехкост и появата на ръжда. В този температурен диапазон по-добре работят термодвойките тип Т.

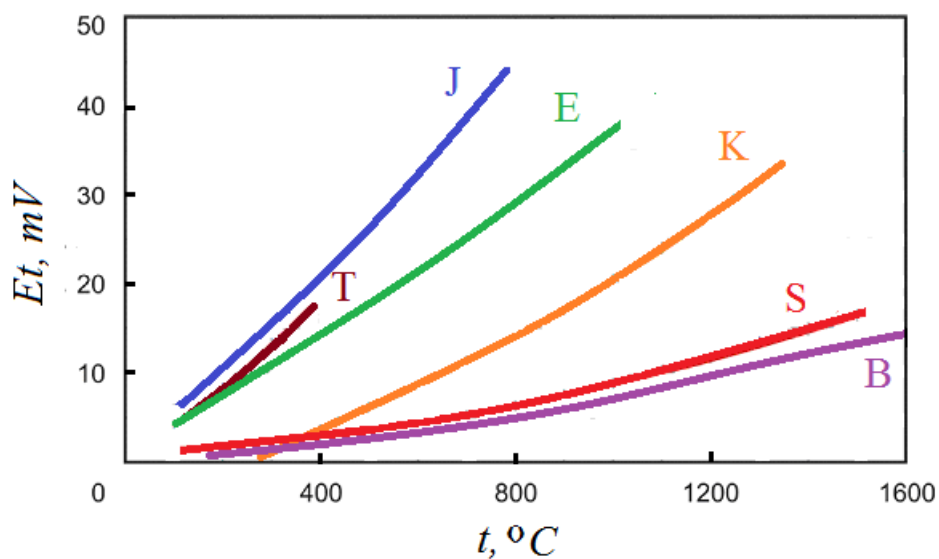
Термодвойките *тип Е* се препоръчва да се използват в температурния диапазон -200...900°C в окислителни или инертни атмосфери. Не трябва да се използват в редуccionна атмосфера или във вакуум. Термодвойките тип Е могат да се използват за измерване на отрицателни температури, тъй като не се подлагат на корозия при работа в атмосфера с повишено съдържание на влага. Те формират най-голямо сред известните типове термодвойки т.е.д.н., затова се явяват най-често използваните.

Термодвойките *тип К* се използват за работа в окислителна и напълно инертна среда за измерване на температури в диапазона -200...1260°C. Благодарение на устойчивостта си към окисляване, често се използват при температури над 540°C. Но термодвойките от този тип не трябва да се използват в редуccionни и серни атмосфери, а също – във вакуум.

Термодвойките *тип R* и *S* са предназначени за непрекъсната работа в окислителна и инертна среда в температурния диапазон 0...1480°C.

Термодвойките *тип В* са подходящи за непрекъсната работа в окислителна и инертна атмосфера в температурния диапазон 870...1700°C. Могат да се използват за кратковременни измервания във вакуум. Такива термодвойки не се препоръчва да се използват в редуccionна среда, съдържаща пари на метали и неметали. Не трябва да се поставят в метални защитни корпуси.

Характеристики на различен тип термодвойки при температура на студените краища 0°C са представени на фиг.9.4.



Фиг.9.4. Характеристики на различен тип термодвойки

За предпазване от химически агресивни среди, термодвойките се поставят в защитни арматури. Арматурата трябва да бъде газонепроницаема, механично здрава и с голяма топлопроводност. При нагряване материалът на арматурата не трябва да отделя газове или пари, вредни за термоелектродите. Арматурите за термодвойките от благородни метали са кварцови или керамични тръбички, а при други – тръбички от специални стомани.

На фиг.9.5 схематично са представени термодвойки и различни начини на изолиране на проводниците им.



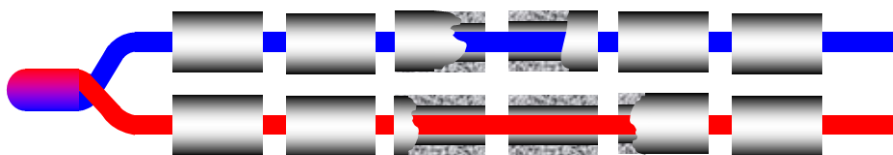
а – с усукани и заварени краища и неизолирани проводници



б – с проводник в керамична тръбичка



в – с изолирани проводници



г – с долепени и заварени краища и керамични изолятори

Фиг.9.5. Термодвойки с различни начини на изолация на проводниците им

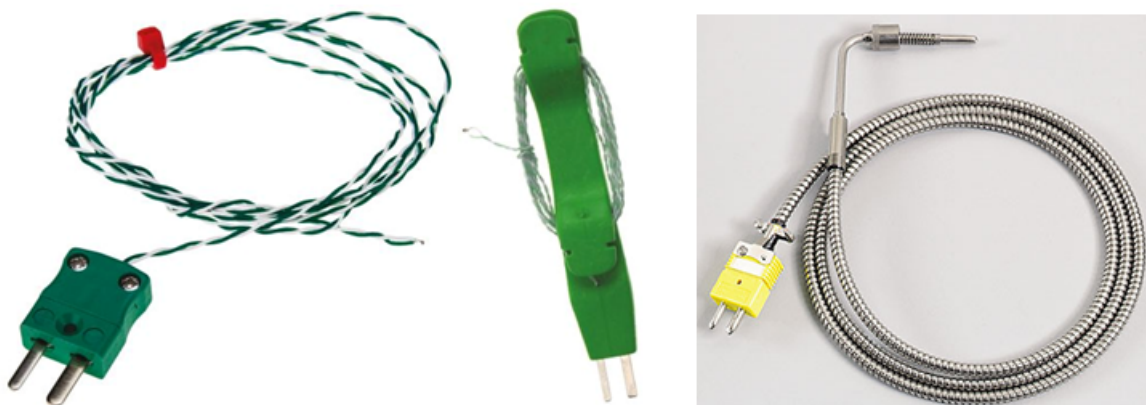
В практиката от различни фирми се предлага голямо разнообразие от термодвойки по отношение на тяхното изпълнение и предназначение.

Производителите предлагат термодвойки, които могат да се използват като отделни чувствителни елементи или като елементи на термочувствителни възли. Термодвойките могат да имат както различен вид защитна арматура и изолация, така и различен дизайн на термочувствителната част (фиг.9.6).



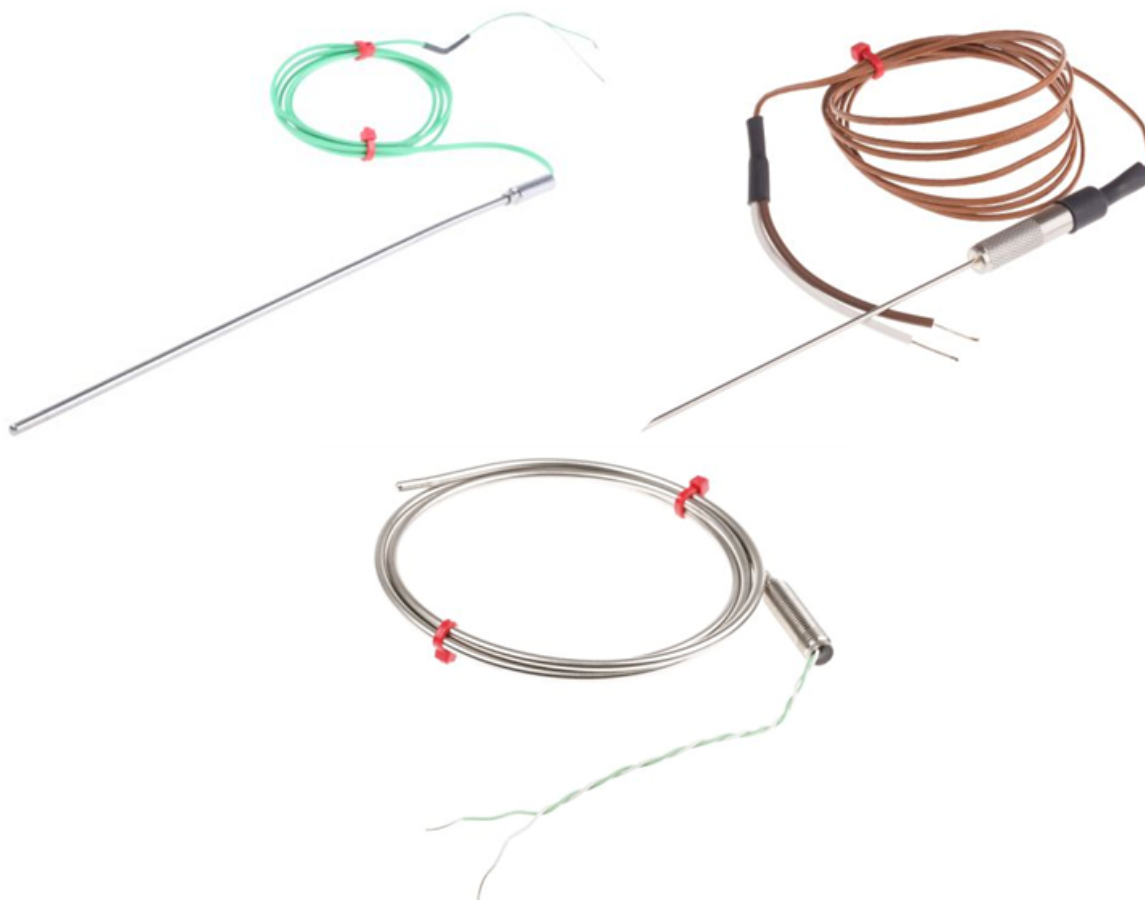
Фиг.9.6. Термодвойки с различни защитни арматури, изолации и дизайн на термочувствителната част

Предлагат се и термодвойки с подходящи конектори (фиг.9.7) за включване към други устройства и схеми.



Фиг.9.7. Термодвойки с конектори

Термодвойките се предлагат и като измервателни сонди (фиг.9.8) за измерване на повърхностната температура, за измерване на температурата в материали, за течащи неокислителни течности и др.



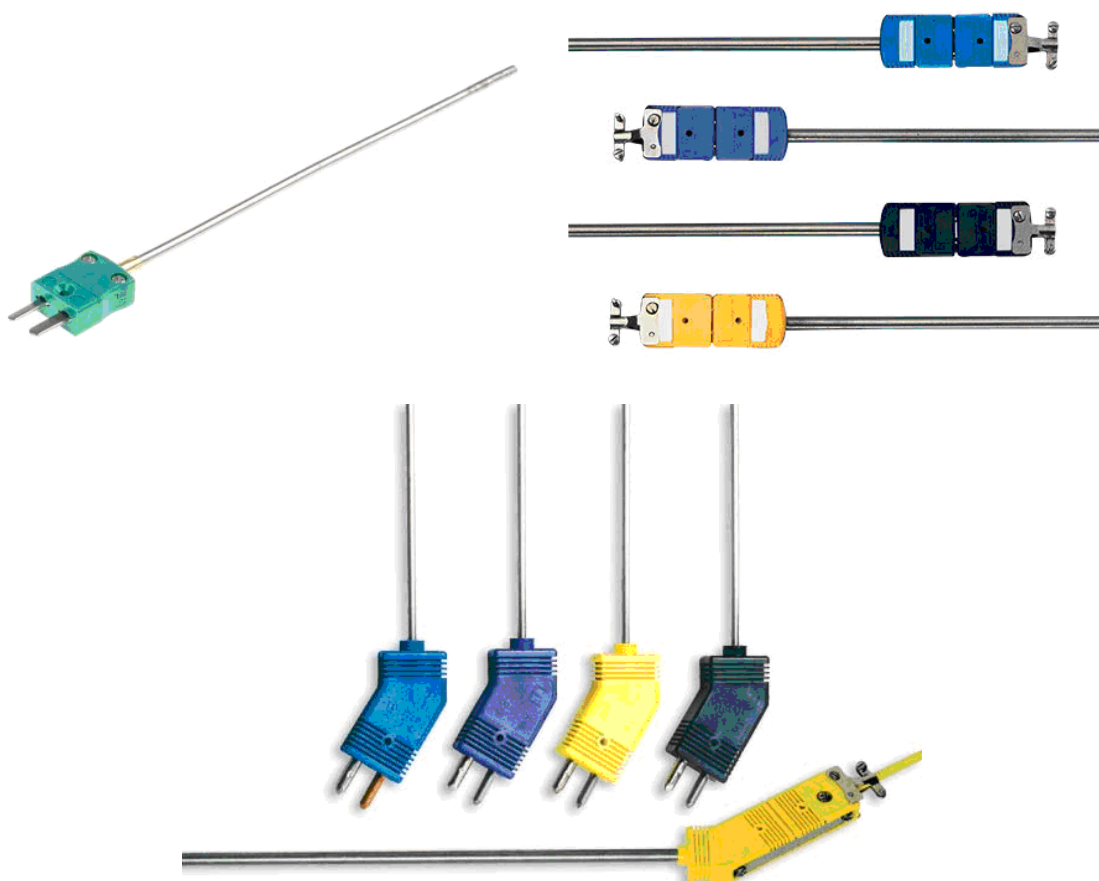
Фиг.9.8. Измервателни сонди с термодвойки

Използват се и ръчни измервателни сонди (фиг.9.9).



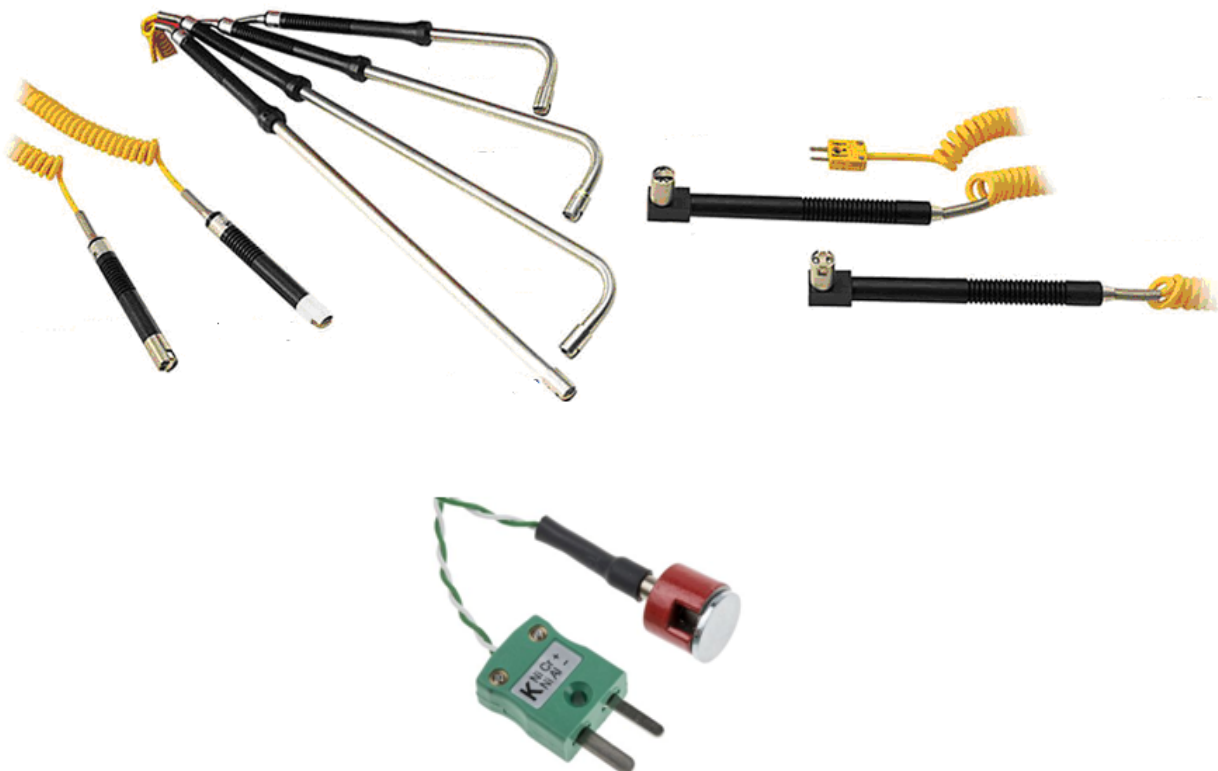
Фиг.9.9. Термочувствителни ръчни измервателни сонди на основата на термодвойки

Измервателните сонди на основата на термодвойки също могат да бъдат с конектори (фиг.9.10).



Фиг.9.10. Измервателните сонди на базата на термодвойки с конектори

Температурните повърхностни сонди на основата на термодвойки могат да бъдат с различна форма и размери (фиг.9.11).

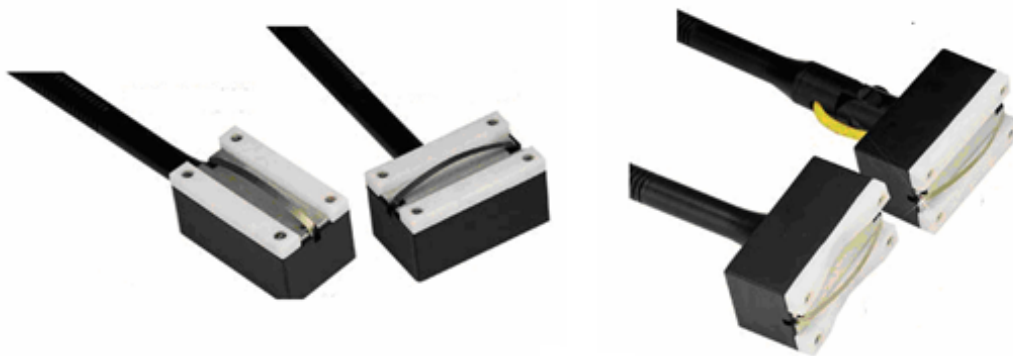


Фиг.9.11. Повърхностни температурни сонди на основата на термодвойки

Произвеждат се специални повърхностни сонди на основата на термодвойки за измерване на повърхностната температура на плочи, стени, калъпи, матрици и други неподвижни повърхности (фиг.9.12), както и специални блокови температурни сонди на основата на термодвойки (фиг.9.13), проектирани със скоби за минимизиране на огъването благодарение на подвижна повърхност.



Фиг.9.12. Специални повърхностни температурни сонди на основата на термодвойки



Фиг.9.13. Специални блокови температурни сонди на основата на термодвойки

На фиг.9.14 е представена и друга разновидност на повърхностните температурни сонди - ролерни повърхностни сонди на основата на термодвойки.



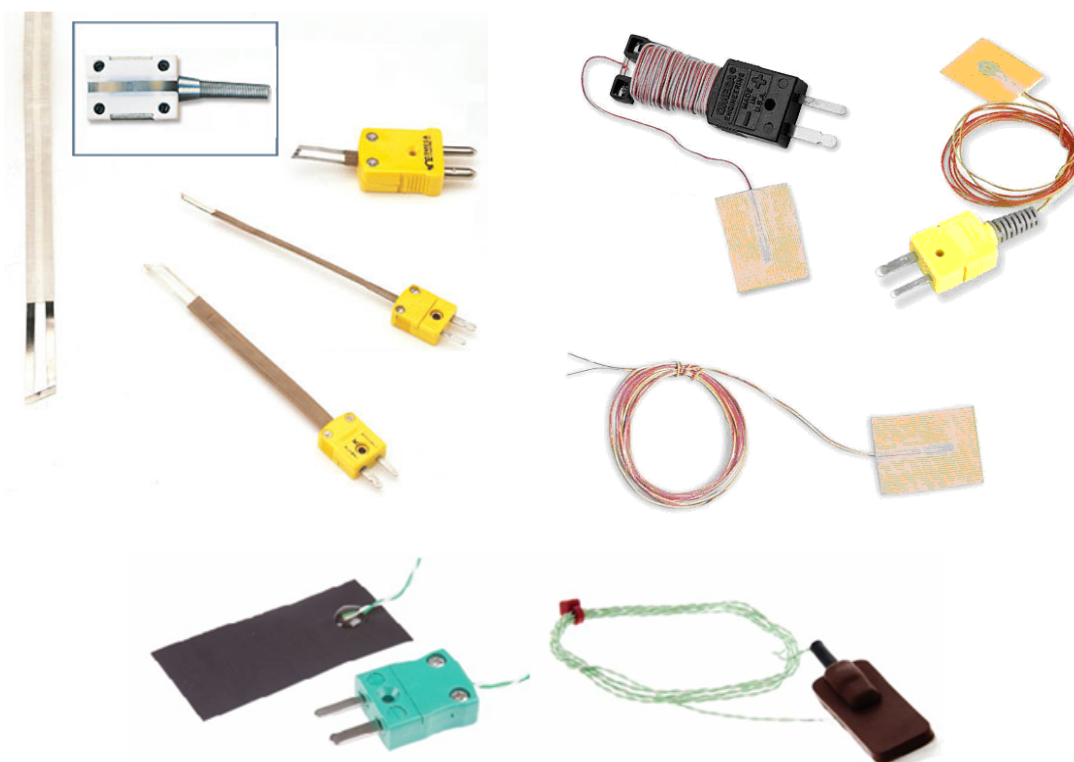
Фиг.9.14. Ролерни повърхностни сонди на основата на термодвойки

За измерването на повърхностната температура на феромагнитни повърхности се произвеждат също термодвойки с магнитно закрепване (фиг.9.15). Термодвойката се окачва посредством пружина.



Фиг.9.15. Термодвойки с магнитно закрепване

Разработени са и тънки листовидни термодвойки, както и такива със самозалепваща се подложка (фиг.9.16), а други – с възможност за измерване на температурата на повърхността на цилиндрични обекти (фиг.9.17).



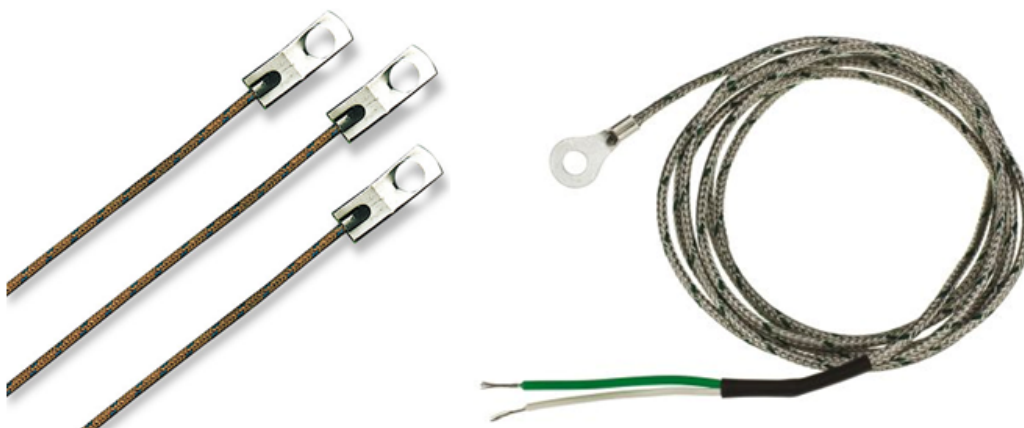
Фиг.9.16. Тънки листовидни термодвойки и повърхностни термодвойки със самозалепваща се подложка



Фиг.9.17. Повърхностни сонди на основата на термодвойки за цилиндрични обекти

Предлага се голямо разнообразие от термодвойки с възможност за монтиране в различни възли за температурно измерване.

На фиг.9.18 са представени шайбовидни термодвойки с възможност за монтиране посредством болтове, а на фиг.9.19 - болтовидни термодвойки.



Фиг.9.18. Шайбовидни термодвойки с възможност за монтираме посредством болтове



Фиг.9.19. Болтовидни термодвойки

Много приложения на термодвойките изискват включването им като елементи на различни конструктивни възли. За тази цел се предлагат сонди на основата на термодвойки с монтажни резби (фиг.9.20).



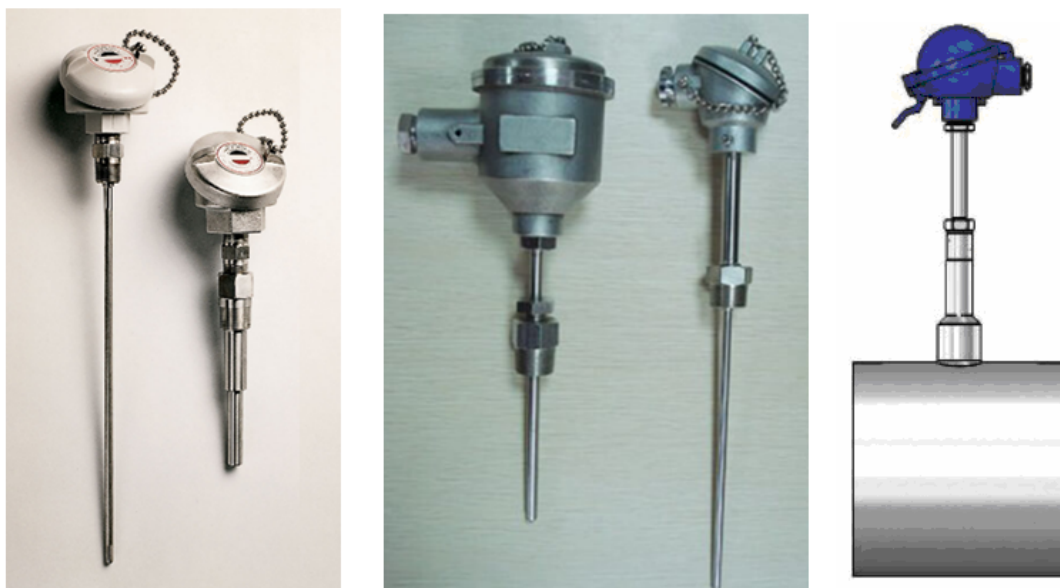
Фиг.9.20. Термочувствителни сонди на основата на термодвойки с монтажни резби

Температурна сонда за поток на основата на термодвойка с възможност за монтиране към съществуващи тръби е показана на фиг.9.21.



Фиг.9.21. Температурна сонда за поток на основата на термодвойка

Термочувствителни сонди на основата на термодвойки със съединителни глави са представени на фиг.9.22.



Фиг.9.22. Термочувствителни сонди със съединителни глави

Монтират се в отвори на производствени тръби или съдове при измерване и контрол на температурата на флуиди. Те съдържат съединителна глава, резбова връзка, сонда с термодвойка или защитна термотръба, в която е разположена термодвойката.

Термотръбите са тръбни фитинги, използвани за защита на температурните сензори, инсталирани в преминаващ поток. Термотръбата представлява затворена в единия край тръба и монтирана в технологичния поток. В отворения край на тръбата се поставя температурният сензор, който обикновено е на открито, извън производствената тръба или съд и всяка топлоизолация. Термодинамично, процесният флуид прехвърля топлината към стената на термотръбата, която от своя страна предава топлината към сензора и се осъществява измерването.

9.2. Терморезисторни преобразуватели

Терморезисторните преобразуватели са термозависими проводници или полупроводници. Основните изисквания към материалите за терморезисторите са:

- да имат голям температурен коефициент на съпротивление (ТКС) - α ;
- да са температурно устойчиви;
- да имат голямо специфично електрическо съпротивление.

Последното е важно за получаване на малогабаритни преобразуватели.

На тези изисквания отговарят частично само някои чисти метали и полупроводници, получени от смеси на метални оксиди.

9.2.1. Метални терморезистори (RTD)

Проводниковите терморезистори са предимно от чисти метали, понеже сплавите имат по-нисък ТКС. Освен това температурната зависимост на съпротивлението при чистите метали е добре известна и уредите с тях могат да работят със стандартна градуировка. Практическо приложение имат металите мед, платина и никел.

Металните терморезистори могат да се изготвят като:

- тънкослойни – от тънък метален слой, отложен върху керамична подложка;
- проводникови навивки върху основа – от проводник, навит около стъклена или керамична основа (макара), която след това е запечатана със специално покритие от разтопено стъкло;
- метална спирала в керамична втулка – в тях чувствителният елемент от проводник, навит като спирала, се поставен в керамична втулка.

Медни терморезистори. За терморезистори се използва електролитна мед. Тя допуска нагряване до 180°C. При по-високи температури започва

да се окислява. Съпротивлението ѝ зависи линейно от температурата от 20°C до 180°C в съответствие с уравнението

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (9.3)$$

където R_0 е съпротивлението при начална температура 0°C (273K), а α – ТКС ($\alpha = 4,3 \times 10^{-3}$, 1/°C от 0°C до 100°C).

Недостатък на медта е малкото специфично съпротивление – за електролитна мед $\rho = 1,75 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$.

Никелови терморезистори. Никелът при добра изолация от въздействието на средата може да се използва като терморезистор до около 280°C, тъй като при по-висока температура зависимостта $R_t = f(t)$ е нееднозначна. В интервала от 0°C до 100°C тази зависимост е линейна ($\alpha \approx 6 \times 10^{-3}$ 1/°C) и се изразява с (9.3). Електрическите свойства на никела зависят от примесите и термичната обработка. Основните предимства на този материал е голямото специфично електрическо съпротивление – $\rho = (7,5 \dots 8,5) \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ и големият ТКС. Това позволява да се реализират терморезистори с малки размери.

Платинени терморезистори. Платината е химически устойчива и има добра пластичност. Позволява да се изтеглят много тънки проводници – до 1,25 μm . Тя допуска нагриване до 1475°C без опасност от окисляване и разтапяне. По тези показатели в много случаи тя е незаменима. Неин недостатък е нелинейната зависимост на съпротивлението ѝ от температурата. Тази зависимост за интервала от 0°C до 660°C се определя с изрази

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (9.4)$$

а за интервала от -180°C до 0°C – с израз

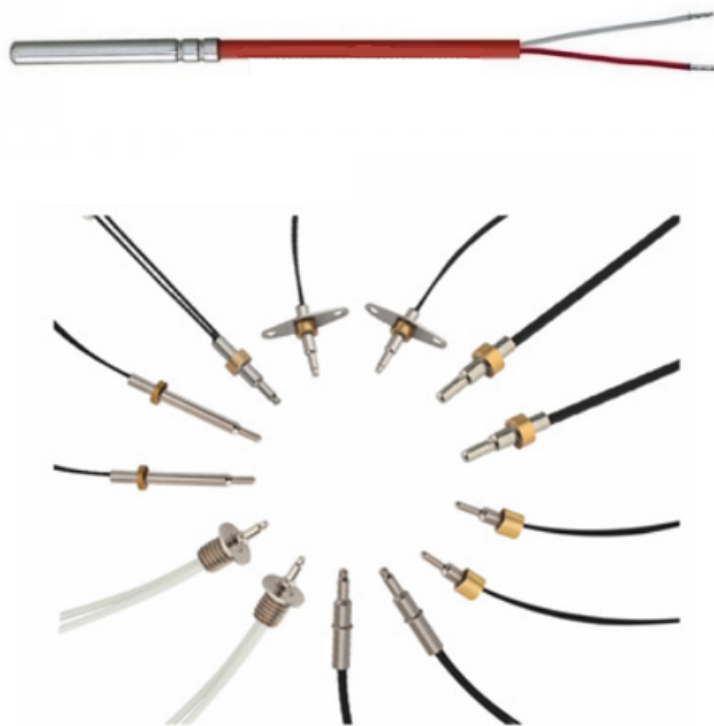
$$R_t = R_0 \left[1 + At + Bt^2 + C(t-100)^3 \right], \quad (9.5)$$

където R_0 е съпротивлението при 0°C, а A , B и C са константи.

За температури, по-високи от 660°C и по-ниски от -180°C, зависимостта $R_t = f(t)$ се задава в таблици.

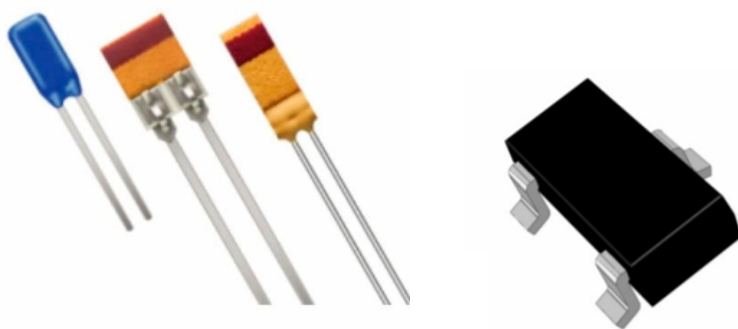
Платинените терморезистори имат много предимства пред останалите. Те са изключително точни, имат широк диапазон на действие, подходящи са за прецизни приложения и имат малки отклонения. Те са най-точни от всички метални терморезистори.

Медни терморезистори са представени на фиг.9.23.



Фиг.9.23. Медни терморезистори

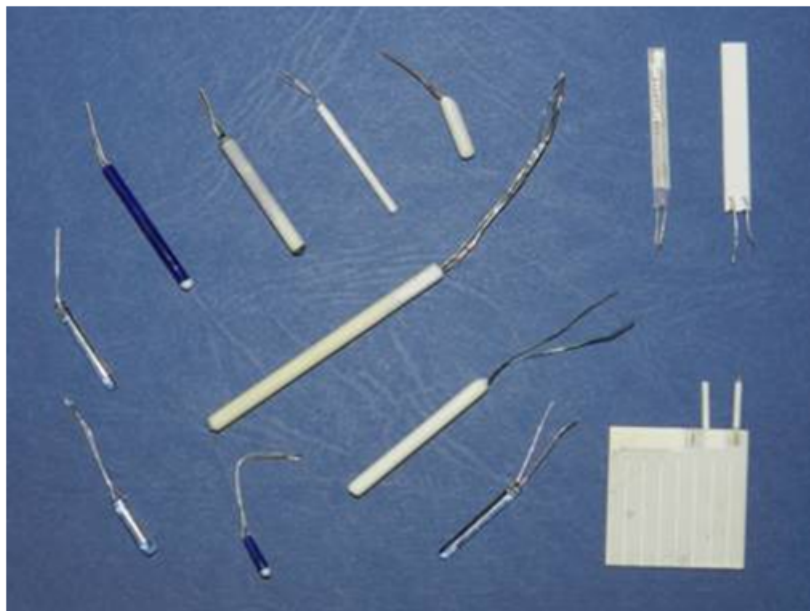
Никелови тънкослойни, в корпус, с навит проводник терморезистори, включително със защитна изолация и съединителни глави, са показани на фиг.9.24.





Фиг.9.24. Никелови терморезистори

На фиг.9.25 са представени платинени терморезистори, подходящи за поставяне в стоманени защитни тръби или върху равни повърхности.



Фиг. 9.25. Платинени терморезистори

На фиг.9.26 са представени платинени температурни сензори в различно изпълнение.



Фиг. 9.26. Платинени температурни сензори в различно изпълнение

Резисторни термометри на основата на платинени терморезистори в конструкцията със съединителни глави са представени на фиг.9.27.



Фиг.9.27.Платинени температурни сензори със съединителни глави

Предлагат се и ръчни температурни сензори Pt100/Pt1000, показани на фиг.9.28.



Фиг.9.28. Ръчни температурни сензори Pt100/Pt1000

9.2.2. Термистори

Термисторите са полупроводникови резисторни преобразуватели с голям ТКС в широк температурен диапазон. Практически се изпълняват в точкова, плоска или цилиндрична форма. При всички случаи се поставят метални изводи (електроди).

ТКС α за всеки полупроводников материал представлява отношение на скоростта на изменение на съпротивлението по отношение на температурата към съпротивлението при зададена температура.

Математически това се изразява като

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} . \quad (9.6)$$

В зависимост от знака на ТКС се различават два типа термистори: с отрицателен ТКС, чието съпротивление намалява с увеличаване на температурата и с положителен ТКС, чието съпротивление се увеличава с увеличаването на температурата. Термисторите от двата типа се изготвят от полупроводникови материали, като диапазонът на изменение на ТКС е от -6,5 до +70%/°C.

Термисторите с отрицателен ТКС (NTC-термисторите) се изготвят от смес на оксиди на такива метали като Mn, Ni, Co, Cu и Fe.

Зависимостта на съпротивлението от температурата е нелинейна и може да се представи с изрази

$$R_T = A \exp(B/T) , \quad (9.7)$$

където T е абсолютната температура (в K), а A и B са константи като $A=R_\infty$ е равна на съпротивлението на термистора при безкрайно висока температура ($1/T=0$), а B е така наречената константа на материала с размерност K.

Стойностите на константата B са обикновено в интервала 3000...5000 K. Константата B може да се представи като

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2} , \quad (9.8)$$

където R_1 и R_2 е съпротивлението на термистора при температури съответно T_1 и T_2 .

NTC-термисторите имат отрицателен температурен коефициент

$$\alpha = - \frac{B}{T^2} , \quad (9.9)$$

който силно зависи от температурата и е 8...10 пъти по-голям от този на металите.

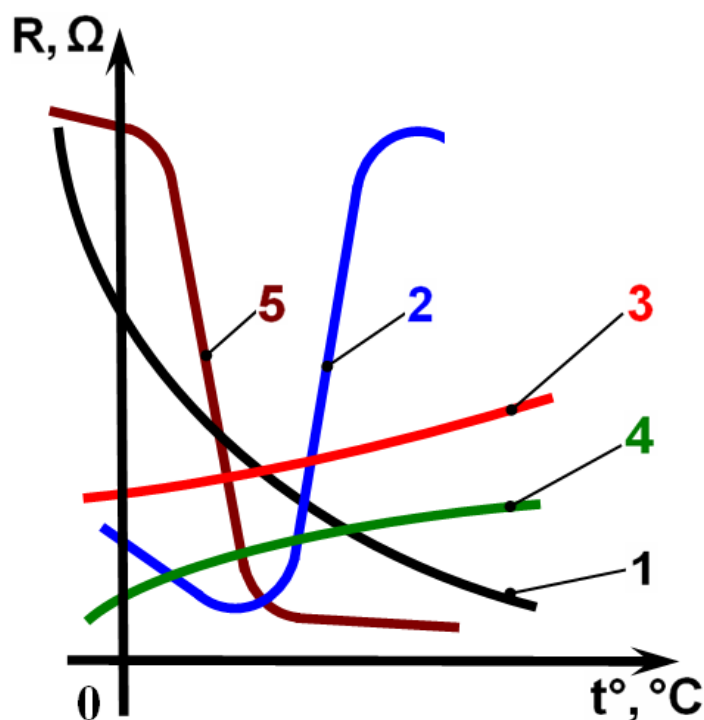
Тези термистори имат и значително по-голямо специфично електрическо съпротивление. Това позволява да се произвеждат термистори с малки размери, които имат и по-малка инертност. Изменяйки състава на материала и размерите на термисторите, може да се получи съпротивление от 1 до $10^6 \Omega$ при стайна температура и ТКС от -2 до -6,5%/°C. От друга страна, термисторите имат нелинейни характеристики $R_T = f(T)$, които не са напълно идентични за термистори от един и същи тип. Това затруднява взаимозаменяемостта им. Чувствителни са към влажността и за предпазване от нейното влияние се покриват с лакова изолация.

Термисторите с положителен ТКС (позисторите – PTC-термисторите) могат да се разделят на две принципно различни групи в зависимост от типа и свойствата на използвания полупроводников материал.

Към първата група се отнасят термистори от обикновен полупроводник (обикновено силиций) във форма на неголяма пластинка с два извода на противоположните страни. Използването на тези елементи е основано на това, че легираните кристали на силиция както от n , така и от p тип имат положителен ТКС при температури от криогенните до 150°C и по-високи. При това ТКС при стайна температура е приблизително равен на $0,8\%/^{\circ}\text{C}$.

Към втората група се отнасят терморезистори с голям положителен ТКС (до $70\%/^{\circ}\text{C}$), но в по-ограничен температурен диапазон. Като материал за такива елементи може да се използва поликристален полупроводников бариерен титанат с голямо изменение на ТКС при температури, близки до температурата на фазовия преход изолатор-метал, съответстваща на температурата на точката на Кюри.

На фиг.9.29 са приведени характеристиките на изменение на съпротивлението от температурата на различни типове термистори и платинен терморезистор.



- 1 – термистор с отрицателен ТКС; 2 – термистор с голям положителен ТКС;
3 – силициев термистор с положителен ТКС; 4 – платинен терморезистор;
5 – термистор с отрицателен ТКС и силно изменение на съпротивлението в определен диапазон

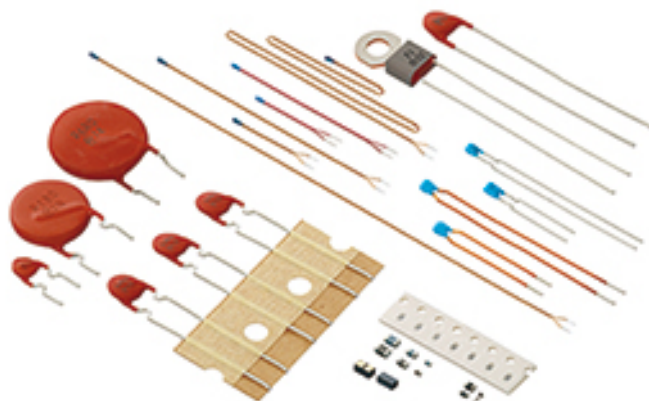
Фиг.9.29. Характеристики на различни типове термистори и платинен терморезистор

Тези термистори, които се характеризират с особено голям ТКС в областта на критичната температура (температурата на Кюри), в редица работи са получили названието *критезистори (CTR-термистори)*. В зависимост от материала, съпротивлението в критичната температурна област може както да се увеличава, така и да намалява (например на основата на BaTiO_3 – крива 2 и на основата на VO_2 – крива 5 от фиг.9.29).

Работният температурен диапазон на съвременните термистори е разширен до 75-1275K, което дава възможност да намират изключително широко приложение.

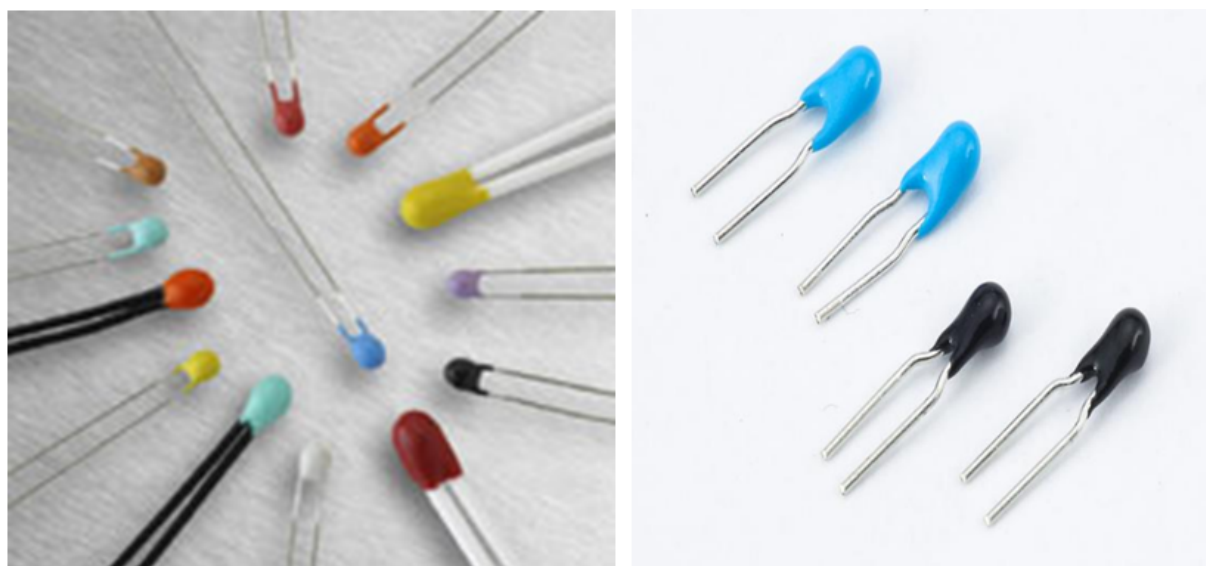
За извършването на прецизни измервания се използват термистори с отрицателен ТКС.

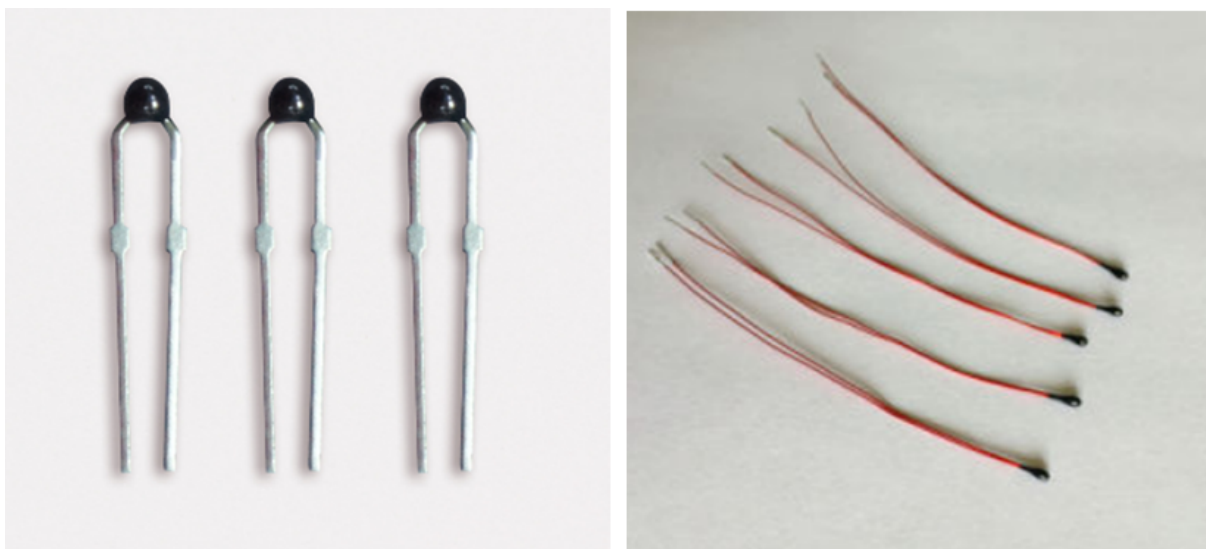
Различни видове термистори, предлагани от производители, са представени на фиг.9.30.



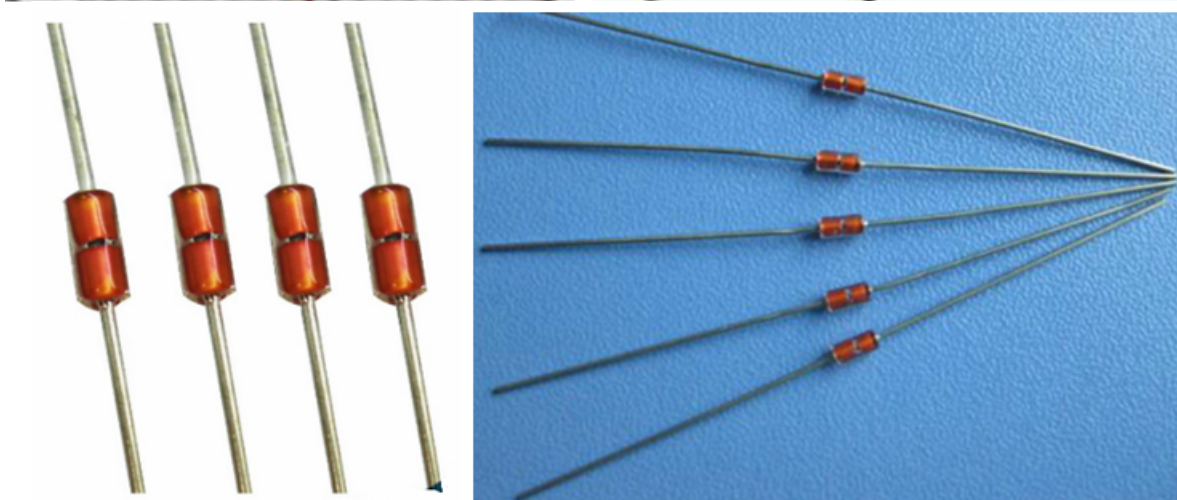
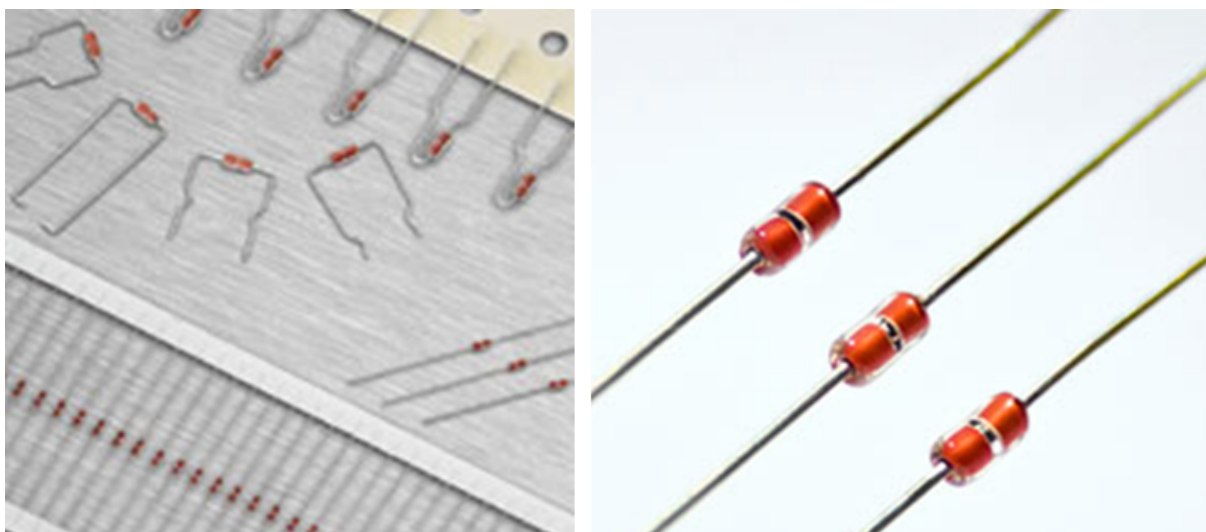
Фиг.9.30. Различни видове термистори

В зависимост от изработката, на фиг.9.31 са обобщени различни групи термистори.

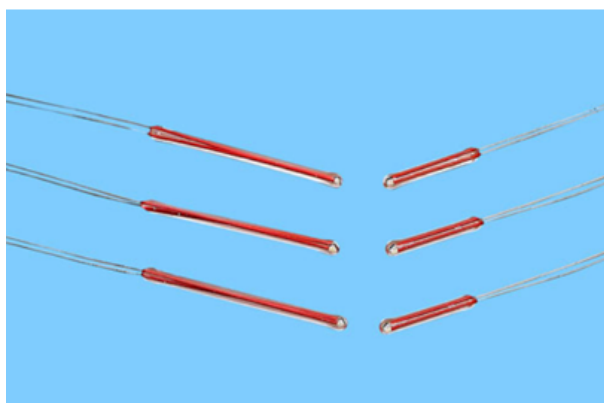
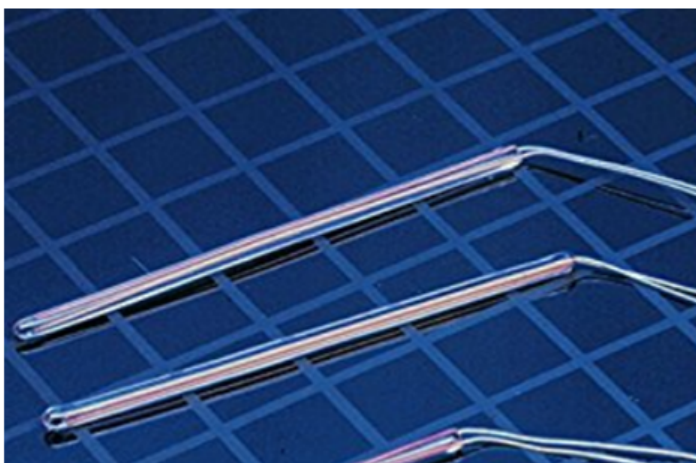
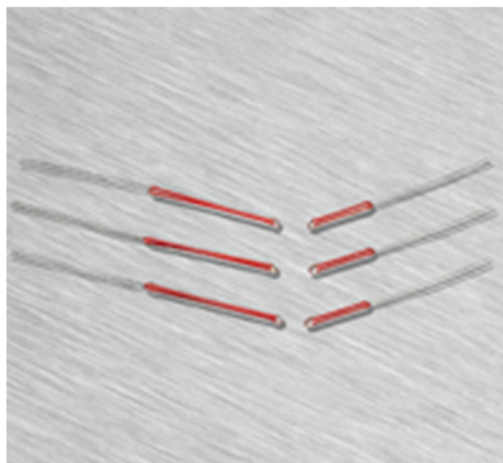




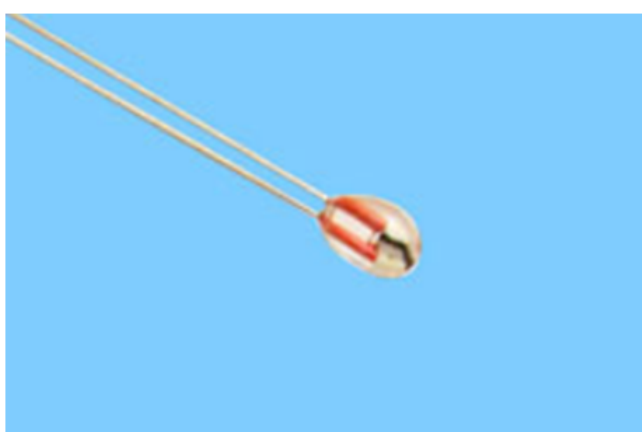
а - термистори с покритие от епоксидна смола

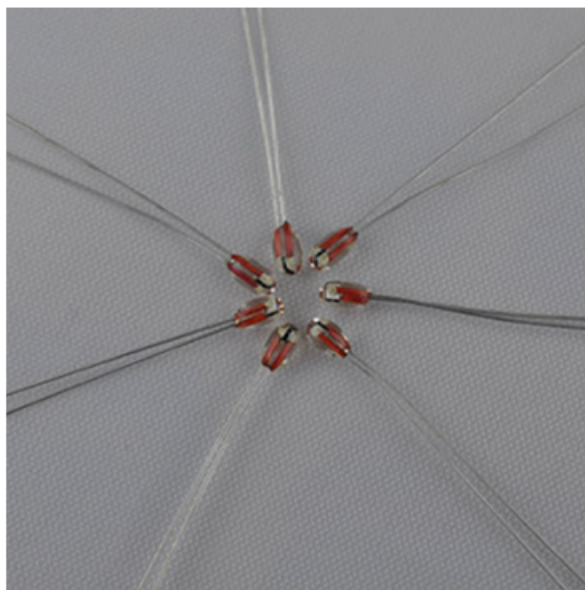


б - стъклено капсуловани термистори

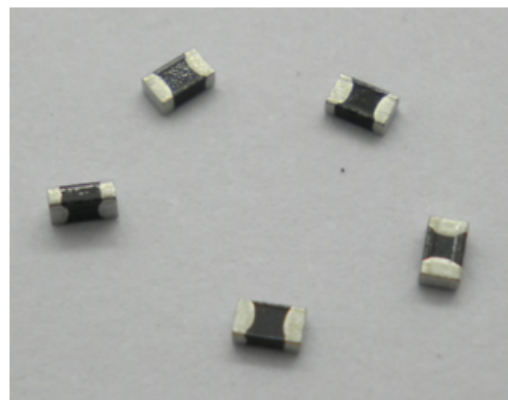
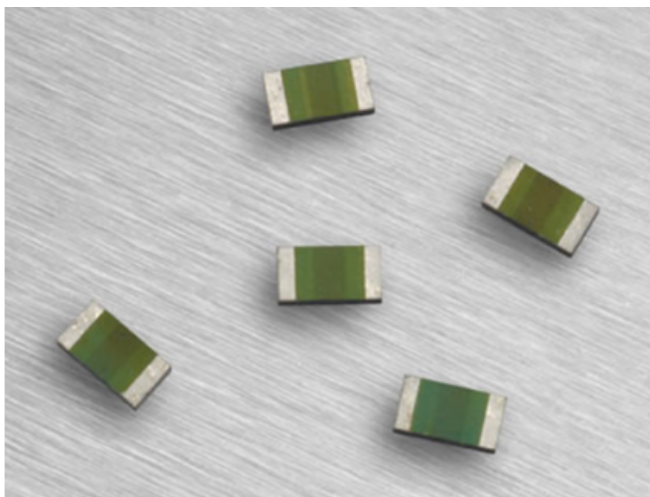
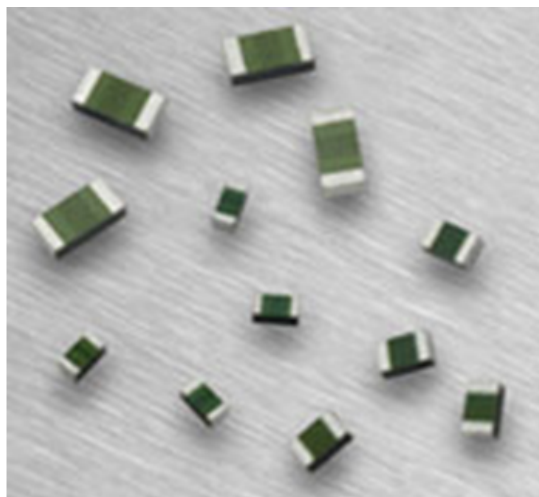


в - термисторни сонди със стъкло покритие

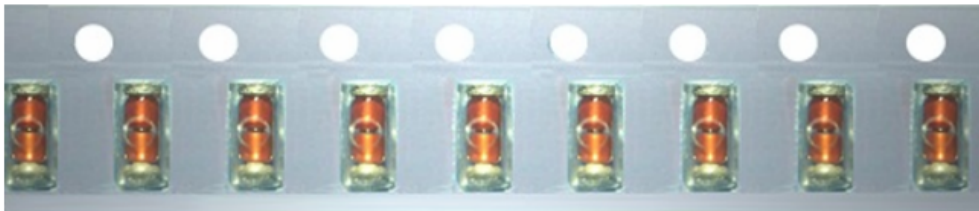




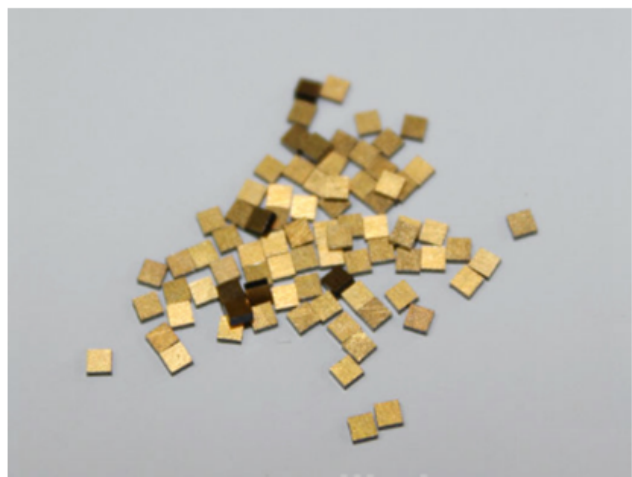
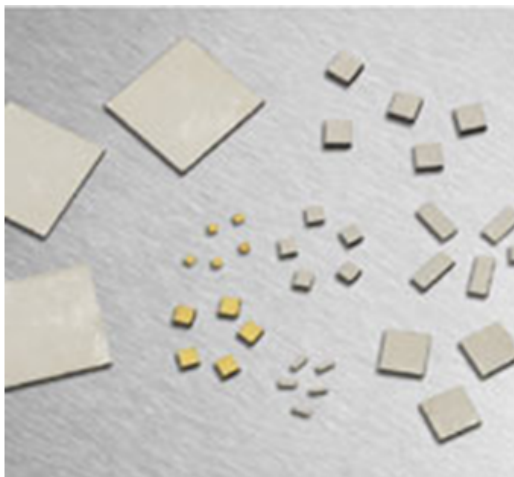
г - чип-термистори със стъклено покритие



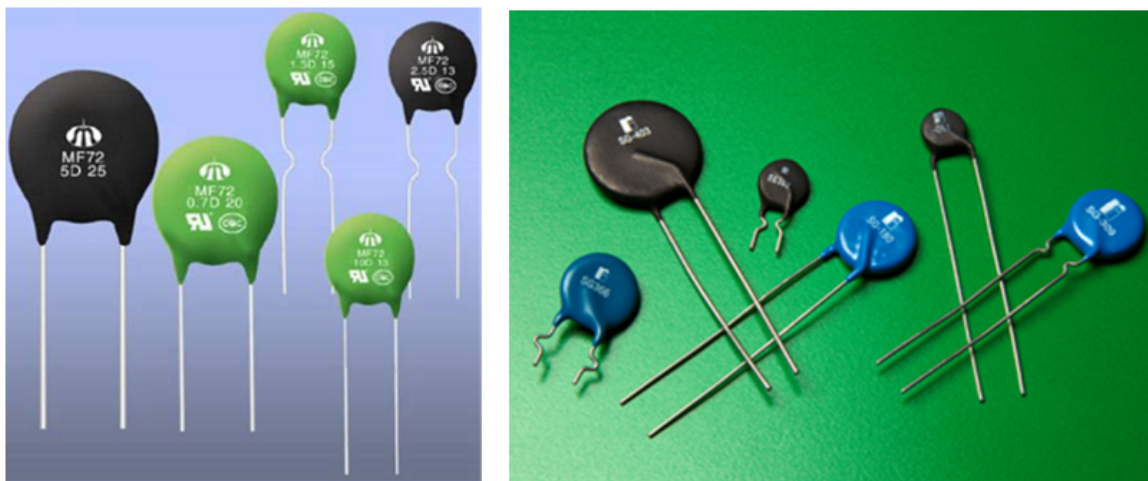
д - термистори за повърхностен монтаж



е - MELF (Metal electrode leadless face) тип термистори



ж - безпроводникови термисторни чипове



З - термистори за използване в токови ограничителни и пускови схеми

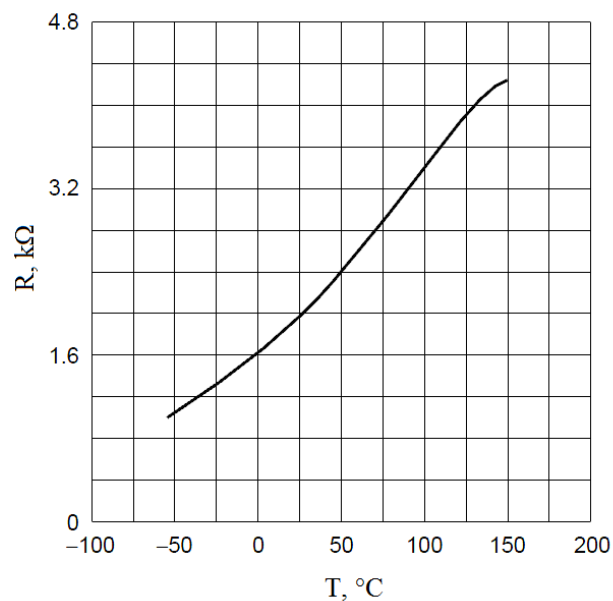
Фиг.9.31. Различни групи термистори в зависимост от изработката

9.2.3. Силициеви температурни сензори

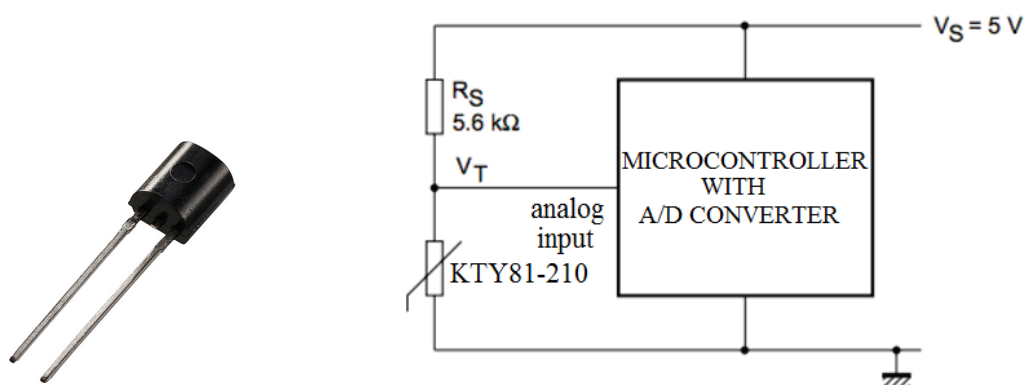
Силициевите РТС-температурни сензори имат по-малко изразена нелинейност и висока стабилност. Областите им на приложение са измерване на температури и контрол на гранични стойности. Дават възможност да се използват в системи, осигуряващи безопасност на нагревателни устройства. Превышаването на температурата (около 200°C), довежда до увеличаване на съпротивлението им, с което се осъществява функцията на защита.

Силициевите сензори от серията КТУ са като полупроводникови диоди. Техният работен температурен диапазон е от -50°C до +150°C (серия КТУ81), от -55° до + 175°C (серия КТУ 83), респективно от 40° до +300°C (серия КТУ84), което е достатъчно за индустриални измервателни цели. Силициевите температурни сензори от серията КТУ81 на фирмата Philips се състоят от чип силиций *n*-тип с размери 500x500x240 μm, метализиран от едната страна и с контактна площадка от другата страна. На фиг.9.32 е показана функцията на преобразуване на сензора КТУ81-210. Тя може да се апроксимира с полином от втори ред, а работният диапазон на сензора е от -50°C до +150°C.

На фиг.9.33 е показан силициевият температурен сензор КТУ81-210 и схемата му на включване към аналогов вход на микроконтролер. Силициевите температурни сензори от серията КТУ се предлагат и в корпуси за повърхностен монтаж.



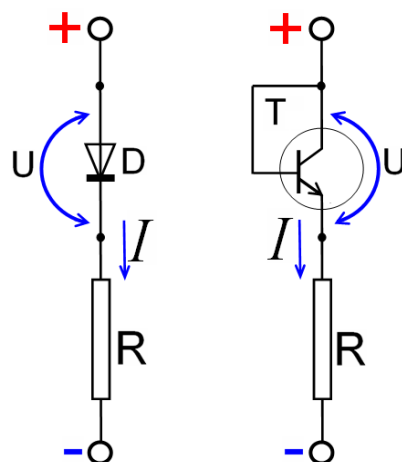
Фиг.9.32. Функцията на преобразуване на сензора КТУ81-210



Фиг.9.33. Силициев температурен сензор КТУ81-210 и схема на включването му към микроконтролер

9.3. Термодиоди, термотранзистори и интегрални температурни сензори

Те са полупроводникови елементи, използвани за измерване на температура обикновено в диапазона $-80^\circ \dots 150^\circ \text{C}$. При тях се използва зависимостта на съпротивлението на p-n прехода от температурата. Диодите се използват в право свързване, а транзисторите – също в право свързване, но в диодна схема (фиг.9.34).



Фиг.9.34. Термодиод и термотранзистор

Чувствителността им спрямо температурата е

$$S_T \approx \frac{dU}{dT}, \text{ V/}^\circ\text{C} . \quad (9.10)$$

Тя е непостоянна, тъй като зависимостта $U = f(T)$ е нелинейна. Средната чувствителност е добра и е от порядъка на $2,5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$

Чувствителността зависи от обратния ток на p-n прехода. Диодите и транзисторите се различават силно по обратния ток, което означава, че трудно може да има взаимозаменяемост между тях. Предимство е ниската им цена.

В значителна степен влиянието на обратните токове се премахва и се получава по-добра линейност, ако се използват два транзистора в един корпус (фиг.9.35). През p-n преходите протичат токове I_1 и I_2 . Важно е тези транзистори да имат равни обратни токове. Схемата е диференциална и изходното напрежение е $U = U_1 - U_2$. Чувствителността на тази схема е много по-малка в сравнение с тази на един транзистор, но характеристиката $U = f(T)$ е много по-линейна:

$$S_T \approx \frac{dU}{dT} = \frac{d(U_1 - U_2)}{dT} \quad (9.11)$$

$$U_1 = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{I_0} \quad (9.12)$$

$$U_2 = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_0} , \quad (9.13)$$

където I_0 са обратните токове на транзисторите, които приемаме за равни; T – температурата в Келвини; k – константа на Болцман; q – заряд на електрона.

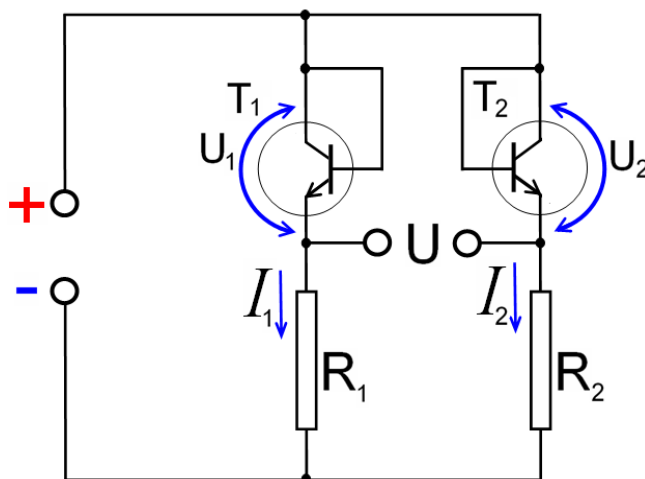
При това

$$U = 86,56 T \ln n , \quad (9.14)$$

където $n = \frac{I_1}{I_2}$.

$$S_T \approx \frac{dU}{dT} = 86,56 \ln n. \quad (9.15)$$

При $n = 2$, $U \approx 60 T \mu V$.



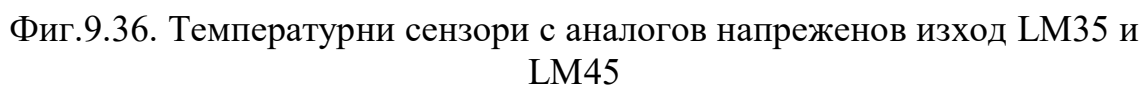
Фиг.9.35. Двойка термотранзистори в един корпус

Тази двойка транзистори може да се изготви върху един кристал като интегрална схема. Тогава параметрите на интегралните транзистори ще са по-добри и характеристиката на получения преобразувател ще бъде почти линейна. Като пример може да се посочи интегрална схема AD390, която дава линейна зависимост. Изходният сигнал е във вид на ток. Работният диапазон е $-55 \dots 150^\circ\text{C}$, като чувствителността е $S_T = 1 \mu A / K$.

Сензорите за температура на базата на интегрални схеми се характеризират с някои особености. Първата е диапазонът на работната температура. Интегралният температурен сензор може да работи в температурния диапазон от -55°C до $+150^\circ\text{C}$. Някои устройства надхвърлят този обхват, докато други работят в по-тесен диапазон. Втората особеност е свързана с тяхната функционалност. Интегралният температурен сензор е интегрална схема, реализирана върху силициев чип и може да включва и схема за обработка на сигнала от сензора, реализирана върху същия чип, както и сензорът. Не е нужно да се проектират схеми за компенсация или линеаризация за температурните сензори, освен ако няма изключително специализирани системни изисквания. Няма нужда от проектиране на компаратор или аналогово-цифрови схеми за преобразуване на техните аналогови изходи в цифров код. Тези функции вече са вградени в интегралните схеми на температурните сензори. Някои интегрални температурни сензори включват схеми за обработка на сигнала, осигуряващи входно-изходен интерфейс за директно включване към

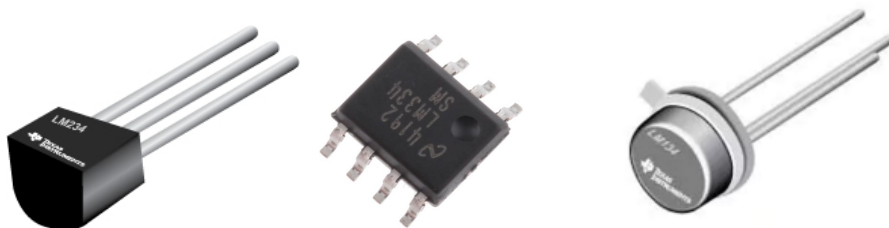
Основните производители на такива температурни сензори са фирмите Analog Devices, National Semiconductor, Texas Instruments, Maxim, Dallas Semiconductor и др. Интегралните температурни сензори се предлагат в следните видове:

LM35 и LM45 са два температурни сензора, на изходите на които се получава напрежение, пропорционално на температурата в $^{\circ}\text{C}$ ($10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$). Номиналното изходно напрежение е 250 mV при 25°C и $1,000\text{ V}$ при 100°C . LM35 е по-точен ($\pm 1^{\circ}\text{C}$ от -55°C до $+150^{\circ}\text{C}$) от LM45 ($\pm 3^{\circ}\text{C}$ от -20°C до $+100^{\circ}\text{C}$). LM45 се предлага в корпус „Tiny” SOT- 23, а LM35 се предлага в пластмасови корпуси TO-92 и SO-8 и в метален корпус TO-46. На фиг.9.36 са показани двата типа температурни сензори с напреженов изход.



LM134, LM234 и LM334 са интегрални температурни сензори с аналогов ток изход. LM134 е също и температурен сензор с изходен ток, пропорционален на абсолютната температура. Чувствителността се настройва с помощта на един външен резистор. Типичните чувствителности са в диапазона от $1\mu\text{A}/^\circ\text{C}$ до $3\mu\text{A}/^\circ\text{C}$. Регулирайки стойността на външния резистор, чувствителността може да бъде подбрана за целия работен температурен диапазон (-55°C до $+125^\circ\text{C}$ за LM134, -25°C до $+100^\circ\text{C}$ за LM234 и 0°C до $+70^\circ\text{C}$ за LM334). LM134 обикновено се нуждае само от 1,2V захранващо напрежение. Сензорите от тази фамилия

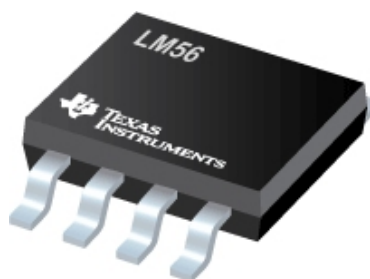
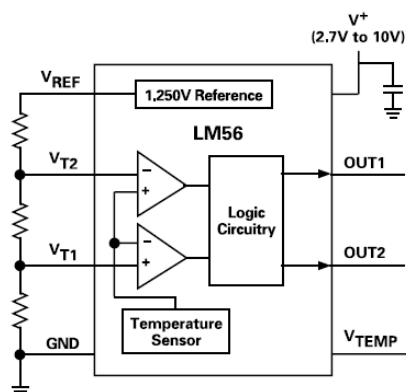
се предлагат в пластмасови корпуси SO-8 и TO-92 и метални корпуси TO-46. На фиг.9.37 са показани сензорите с аналогов токов изход.



Фиг.9.37. Температурни сензори с аналогов токов изход

- Температурни сензори с компараторен изход (*Comparator-Output Temperature Sensors*)

LM56 е температурен сензор с компараторен изход. Той включва температурен сензор, референтно напрежение 1,25V и два компаратора с предварително зададен хистерезис (фиг.9.38). LM56 работи със захранващо напрежение между 2,7 V и 10 V и консумира максимум 200 μ A ток. Работният температурен диапазон е от -40°C до +125°C. Вътрешният температурен сензор изработва изходно напрежение $6,2 \text{ mV} \times T (^{\circ}\text{C}) + 395 \text{ mV}$. Трите външни резистори задават праговете за двата компаратора.



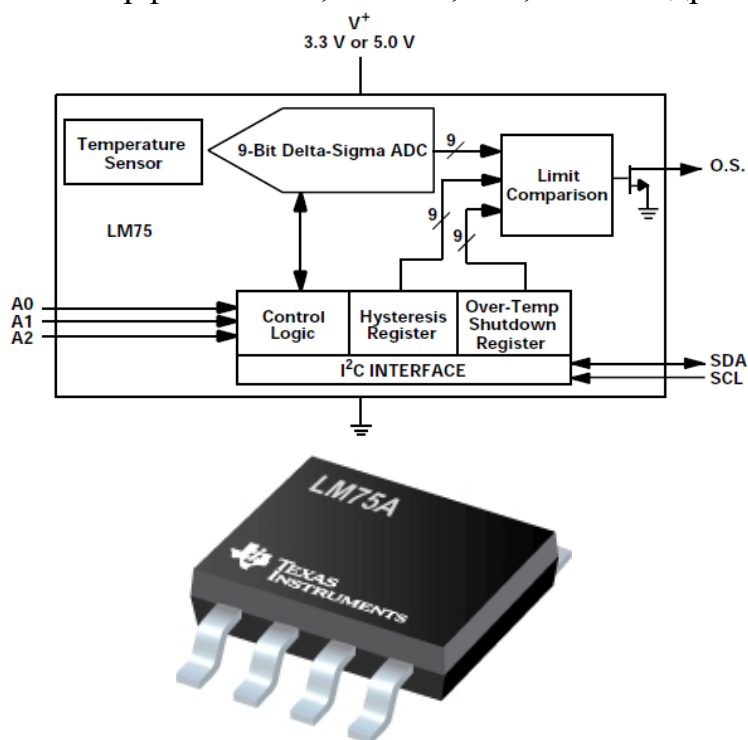
Фиг.9.38. Температурен сензор с компараторен изход LM56

- Температурни сензори с цифров изход (*Digital Output Sensors*)

LM75 е цифров температурен сензор с двупроводников интерфейс. Той може да се използва и за топлинна защита. LM75 съдържа температурен сензор, делта-сигма аналогово-цифров преобразувател, двупроводников цифров интерфейс и регистри за управление на работата на интегралната схема (фиг.9.39). Двупроводниковият интерфейс използва протокол I²C.

Температурата непрекъснато се измерва и може да се прочете по всяко време. LM75 има специален изход за висока температура (O.S.) с програмируема граница и хистерезис. LM75 може да се използва в подсистема за наблюдение и контрол на температурата на микропроцесорно базирани системи, като персонални компютри.

Данните за температурата се представят с 9-битова дума (1 знаков бит и 8 бита за стойността), което води до разделителна способност 0,5°C. Точността е $\pm 2^{\circ}\text{C}$ от -25°C до $+100^{\circ}\text{C}$ и $\pm 3^{\circ}\text{C}$ от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Температурните сензори с цифров изход се предлагат с различни комуникационни интерфейси - I²C, SMBus, SPI, PWM и др.



Фиг.9.39. Температурен сензор с цифров изход I²C

В табл. 9.2 са представени някои цифрови температурни сензори на основните фирми-производители.

Таблица 9.2 Цифрови температурни сензори, произвеждани от Analog Devices (AD), National Semiconductor (LM), Maxim (MAX) и Dallas Semiconductor (DS)

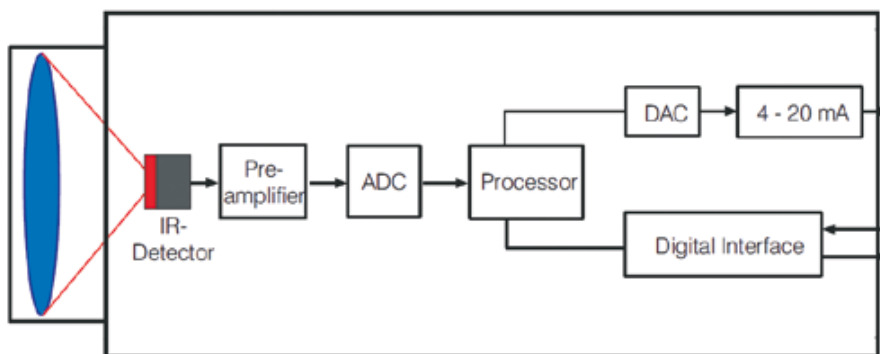
Тип	Температурен диапазон	Изходен сигнал	Грешка	Разделителна способност
AD7416	-55°C to +125°C	10-bit serial, I ² C/SMBus	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,25^{\circ}\text{C}$
AD7817	-55°C to +125°C	10-bit serial, I ² C/SPI	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,25^{\circ}\text{C}$
MAX6635	-55°C to +150°C	2-wire, SMB	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,0625^{\circ}\text{C}$
MAX6662	-55°C to +150°C	3-wire, SPI	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,0625^{\circ}\text{C}$
LM74	-55°C to +150°C	12-bit serial + 1-bit sign, SPI	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,0625^{\circ}\text{C}$
LM92	-55°C to +150°C	12-bit serial + 1-bit sign, SPI	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,0625^{\circ}\text{C}$
DS1624	-55°C to +125°C	12-bit serial + 1 bit sign, 2-wire, SMB	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,03125^{\circ}\text{C}$
DS18B20	-55°C to +125°C	9- to 12-bit serial, 1-wire, SPI	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,0625^{\circ}\text{C}$

9.4. Безконтактни температурни сензори

Всяко тяло с температура над абсолютната нула излъчва от повърхността си електромагнитно лъчение, което е пропорционално на вътрешната му температура. Част от това лъчение е инфрачервено и може да се използва за измерване на температурата на тялото. В съответствие със закона на Стефан-Болцман, общият топлинен поток на излъчващото тяло е пропорционален на четвъртата степен на неговата температура. Тъй като инфрачервените термометри работят без контакт с обекта, те позволяват измерването на много високи температури (до 3500°C). Друго важно предимство е възможността за измерване на температурите на материали с ниска топлопроводимост.

Инфрачервеният термометър се състои от леща, която фокусира инфрачервената енергия върху чувствителен елемент (фиг.9.40). Чувствителният елемент генерира електрически сигнал, пропорционален на излъчването, който впоследствие се усилва и може да се обработи допълнително. След цифрова обработка сигналът се трансформира в изходна стойност, пропорционална на температурата на обекта, който след това или се визуализира на дисплей, или се предоставя като аналогов сигнал. При това се компенсира и влиянието на температурата на околната среда.

Инфрачервените термометри поддържат изходи 4-20 mA и 0-10 V, които позволяват лесно свързване в системи за управление. Освен това инфрачервени термометри се предлагат също с цифрови интерфейси (например USB, RS485, Ethernet).



Фиг.9.40. Структура на инфрачервен термометър

Най-важният елемент във всеки инфрачервен термометър е радиационният приемник, наричан още детектор. Има две основните групи инфрачервени детектори: топлинни и квантови.

При топлинните детектори в резултат на абсорбцията на електромагнитно лъчение се променя температурата на чувствителния елемент. Промяната на температурата води до промяна на параметрите на детектора, която служи като мярка за абсорбираната енергия.

- *Пирометри*

Съществуват два вида пирометри - *радиационен пирометър* и *оптичен пирометър*. В радиационния пирометър радиацията се фокусира върху температурно-чувствителен сензор, който се нагрява от лъчението. Температурен сензор в радиационния термометър може да бъде всеки от контактните сензори, описани по-горе. Ако сензорът е резисторен, например платинен сензор или термистор, инструментът се нарича болометър.

Когато температурата се измерва с помощта на термоелектрически сензор (термодвойка, матрица термодвойки - thermopile или пироелектричен сензор), той се нарича пирометър. Сензорът в радиационен пирометър генерира напрежение, пропорционално на повишаването на температурата, дължащо се на излъчването. Сензорът може да бъде или термодвойка (или матрица от термодвойки - thermopile), или пироелектричен сензор, който е чувствителен към инфрачервено лъчение. За тази цел се използват специални инфрачервени чувствителни термодвойки.

Оптичният пирометър съдържа нишка, която може да бъде загорята по електрически път до известна температура. В оптичния пирометър цветът на загорятата нишка се сравнява с горещото тяло във фонов режим. Температурата на нажежаемата нишка се регулира, докато изчезне (когато има същия цвят като фона от горещото тяло). Така в този момент температурата на нажежаемата жичка е същата като температурата, която се измерва.

- *Инфрачервени термодвойки*

Инфрачервените термодвойки използват конвенционални термодвойки тип J, K, T или E. Всички инфрачервени термодвойките съдържат система за детектиране на топлинната енергия, излъчена от измервания обект.

Изменението на температурата се измерва директно с термодвойката. Типичните изходни напрежения са в обхвата на mV. Инфрачервените термодвойки могат да се използват в диапазона от -73°C до 2800°C.

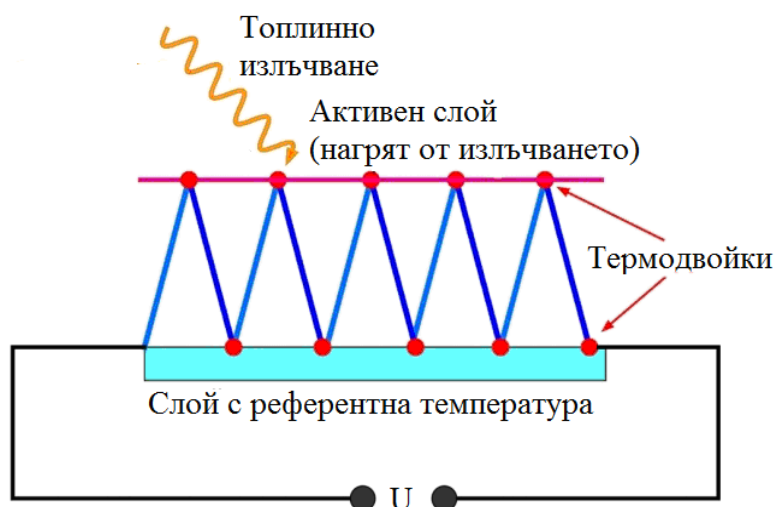
Инфрачервените термодвойки се предлагат в разнообразни конструкции. Има две основни групи: с регулируемо и с фиксирано разстояние от измерваната повърхност. Към първата група се отнасят инфрачервените термодвойки, които имат малък фокус. Разстоянието между термодвойката и измервания обект е от 0 до 10 mm. Те обикновено са предназначени за измерване на по-ниски температури - до 300°C. Термодвойките от втората група имат фокус до 100:1 и те са предназначени за измерване на по-високи температури. Разстоянието между термодвойката и измервания обект варира от 0 до 2000 mm. Когато сензорите с инфрачервена термодвойка се използват в замърсена среда, замърсяването между главата на термодвойката и измервания обект може значително да влияе върху

точността на измерването.

Инфрачервените безконтактни температурни сензори, базирани на матрични термодвойки (thermopile) са подходяща алтернатива за безконтактните температурни сензори. Те не се нуждаят от източник на енергия и система за управление. Освен това, тази технология предлага изключителна линейност и прецизност.

Един инфрачервен матричен сензор се състои от обектив, инфрачервен лентов филтър, матрица от термодвойки, термистор и ASIC интегрална схема. Термисторът се използва за измерване на температурата на околната среда. Така наречената thermopile матрица се състои от термодвойки, които са свързани последователно. Измерват се напреженията в двата края, които съгласно ефекта на Зеебек са пропорционални на температурната разлика между контакта и двата края (фиг.9.41). Това позволява матрицата да регистрира широк спектър на светлината в диапазона от ултравиолетовата до инфрачервената.

Подредените елементи – термодвойки, формират матрицата. Те отчитат температурата на обекта и температурата на околната среда, което позволява да се определят посоката на движение и топлинното изображение на обекта, което дава възможност за едновременно откриване на статични и движещи се обекти.



Фиг. 9.41. Структура на матричните термодвойки (thermopile матрица)

Безконтактните сензори с инфрачервени термодвойки намират различни приложения. Те могат да се използват за измерване на температура на движещи се обекти, за откриване на "горещи точки" в чип на интегрална схема, за измерване на температурата при високотемпературни производствени процеси, за измерване на температурата на биологични обекти и т.н. Безконтактните сензори с инфрачервени термодвойки с отделена оптика, свързани чрез оптично влакно, също се използват за лазерен контрол в металообработване, леене под налягане, плазмено

рязане, непрекъснато леене и др. Те предоставят възможност за откриване или броене на лица и могат да бъдат използвани за създаване на системи за сигурност, където откриването на хора, които може да са неподвижни или да се движат, задейства аларма. Възможността за измерване на температурата на даден обект или човек е интересно както в производствения контрол, мониторинга на процеси и мониторинг на машини, така и за инженеринга в областта на сигурността, пожароизвестителните системи за ранно предупреждение и термографията в реално време в областта на научните изследвания и развойната дейност.

Основен недостатък в работата на безконтактните температурни сензори е необходимостта от прецизно настройване за осигуряване на висока точност. При това се използват корекционни коефициенти, отчитащи типа на контролираната повърхност.

Съвременните безконтактни температурни сензори могат да определят температурата на големи разстояния. Някои типове сензори имат допълнителен лазерен указател, позволяващ по-точно фиксиране на обекта за измерване.

На фиг.9.42 са показани инфрачервени температурни сензори от серията thermoMETER CS, предлагани от немската фирма Micro-Epsilon Messtechnik GmbH.



Фиг. 9.42. Инфрачервени температурни сензори на фирмата Micro-Epsilon Messtechnik GmbH.

Основното, което отличава квантовите детектори от термичните, е тяхната по-бърза реакция при абсорбиране на инфрачервеното лъчение. Начинът на работа на квантовите детектори се основава на фотоефекта. Фотоните на инфрачервеното лъчение водят до увеличаване на електроните на по-високо енергийно ниво в полупроводниковия материал. Когато електроните се връщат обратно, се генерира електрически сигнал или се променя електрическото съпротивление. Квантовите детектори са много бързи (времеконстантите им са от наносекунди до микросекунди).

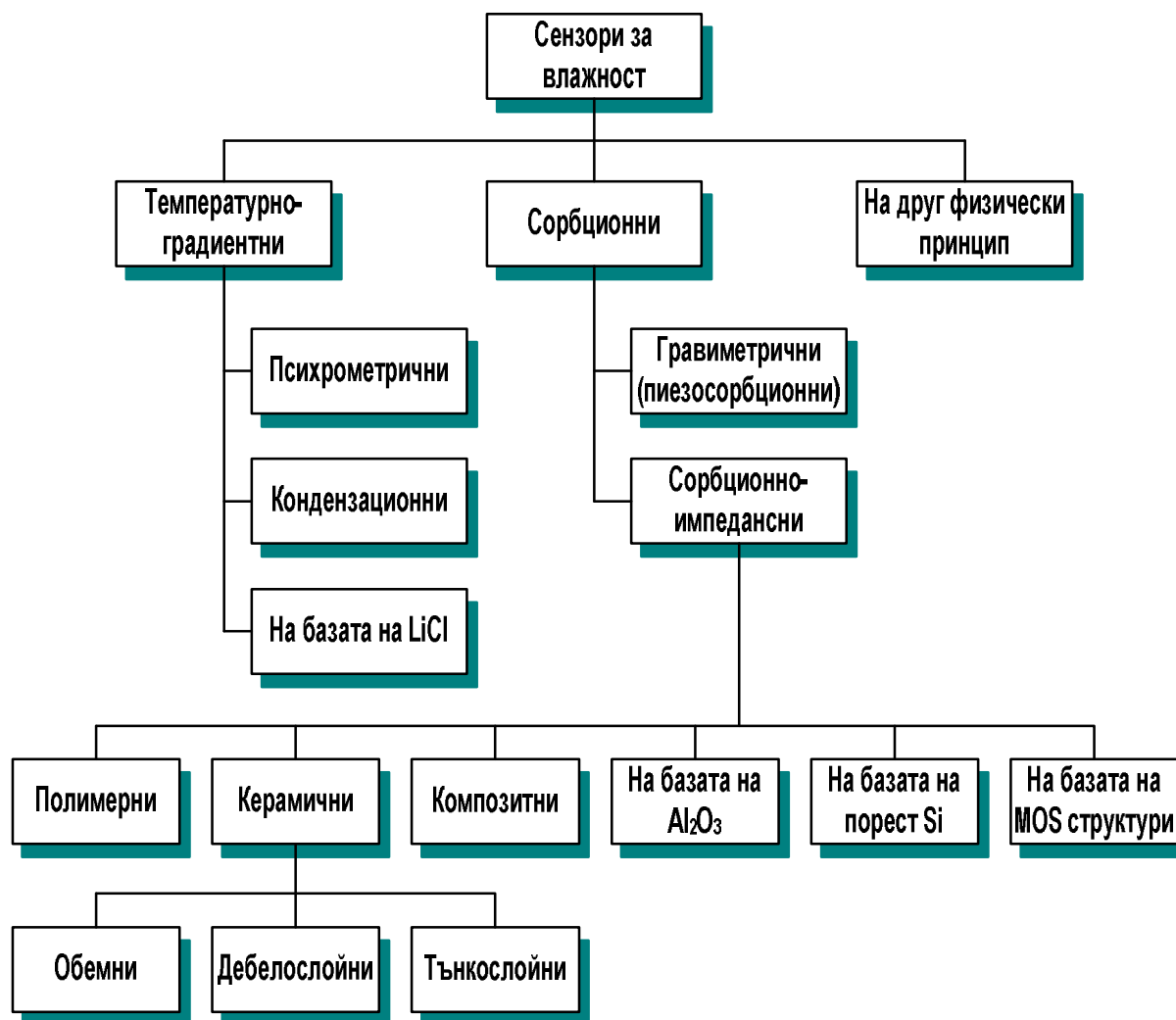
Температурата на чувствителния елемент на топлинния детекторът се променя относително бавно. Времеконстантите на топлинните детектори са по-големи от времеконстантите на квантовите и са от порядъка на милисекунди.

ГЛАВА 10. СЕНЗОРИ ЗА ВЛАЖНОСТ И ГАЗОВЕ

10.1. Сензори за влажност

Нивото на влажността оказва съществено влияние на редица технологични процеси. Влажността на атмосферния въздух или технологичния газ е един от важните параметри, определящи качеството на изходните продукти в много технологични процеси. Затова измерването на влажността на газове има голямо значение и широко се използва в индустрията.

Класификация на сензорите за влажност е представена на фиг.10.1.



Фиг.10.1. Класификация на сензорите за влажност

10.1.1. Температурно-градиентни сензори за влажност

- **Психрометрични сензори за влажност**

Психрометричният метод е предназначен за измерване на относителната влажност на въздуха при температури, по-високи от 273 K, и е основан на

зависимостта на влажността на въздуха от показанията на сух и влажен термометър. При това температурата на влажния термометър зависи от интензивността на изпарение на водата от овлажнената повърхност. На точността и надеждността на метода влияят редица фактори: точност на термометрите, скорост на въздушния поток, обтичащ овлажняващ термометър, взаимно разположение на термометрите и др. Като термочувствителни елементи се използват термодвойки, термистори, диоди и др.

- ***Кондензационни сензори за влажност***

Кондензационният метод е основан на зависимостта на температурата на кондензация на парите на водата на охладена повърхност на твърдото тяло от концентрацията на водните пари. Към предимствата на метода се отнасят възможността за измерване на влажност в широк диапазон на концентрация на водните пари, температурата и налягането на анализираната среда, а също градуировката на сензорите по температура, а не по влажност. При реализацията на метода е необходимо да се осъществи регулируемо охлаждане на кондензиращата повърхност на детектора, точна фиксация на момента на появяване на слоя кондензат с едновременно регистриране на температурата на кондензиращата повърхност. За определяне на момента на образуване на слоя кондензат се използват оптоелектронни и електрически методи, а също така структури на базата на повърхностни акустични вълни.

- ***Температурно-градиентни сензори на базата на литиев хлорид***

Принципът на действие на този сензор се състои в нагряване на солеви разтвор на базата на LiCl дотогава, докато в разтвора не се установи налягане на парите, равно на налягането на водните пари в анализираната среда. Знаейки тази температура може да се определи налягането на водните парите и оттам - температурата на точката на кондензация. Сензорът се състои от тръба, обвита с тъкан, която е напоена с разтвор на LiCl. Върху тръбата са навити два електрода от корозионно устойчив метал. На електродите се подава променливо напрежение и в разтвора протича ток, който го нагрява и предизвиква изпарение на водата. След изпарение на водата, токът, преминаващ между електродите, рязко намалява, тъй като проводимостта на кристалния LiCl е значително по-ниска от проводимостта на разтвора. В резултат на това се намалява температурата на сензора. Така се установява равновесие между твърдия LiCl и неговия разтвор. Това равновесие настъпва при температура, непосредствено свързана с налягането на водните пари. Температурата се измерва със сензор Pt100, който е част от конструкцията на сензора. По тази температура се определя съдържанието на влага във въздуха.

10.1.2. Сорбционни сензори за влажност

Принципът на действие на сензорите от тази обширна група е основан на явлението сорбция на влага от анализираната среда. Извършващите се при това изменения на физико-химичните или електрофизични параметри на чувствителния елемент на сензора, намиращ се в хидротермично равновесие със средата, служат като мярка за определяне на съдържанието на влага.

В зависимост от вида и механизма на сорбция се различават адсорбционни, абсорбционни и хемосорбционни сензори за влажност. В първите от тях сорбцията на парите на водата се извършва на повърхността на непорест сорбент или на повърхността на порите в порест. В сензорите от абсорбционен тип поглъщането на влага се осъществява от целия обем на сорбента. В хемосорбционните сензори сорбираната вода химически взаимодейства с материала на сорбента.

В сензорите от адсорбционен и абсорбционен тип поглъщането на влагата от сорбента се съпровожда с изменение на неговата маса и електрофизични характеристики като съпротивление, капацитет, диелектрична проникваемост и др. В съответствие с това се различават сензори от гравитационен тип, към които преди всичко се отнасят пиезосорбционните сензори, основани на изменения на масата на сорбента, и импедансни сензори, основани на изменението на пълното съпротивление (или на една от неговите съставляващи) на сорбента.

- **Гравиметрични (пиезосорбционни) сензори на влажност**

Измерването на присъединената маса на пиезокварцовите резонатори позволява да се регистрират сорбции на ниво 10^{-9} - 10^{-12} g/cm², което дава възможност да се реализират гравиметрични или пиезосорбционни сензори на влажност, притежаващи висока чувствителност и точност на измерването. В сензорите от този тип при сорбция на влага се изменя масата на сорбента, нанесен на повърхността на пиезокварцовия резонатор, което довежда до изменение на честотата на резонанса със стойност Δf

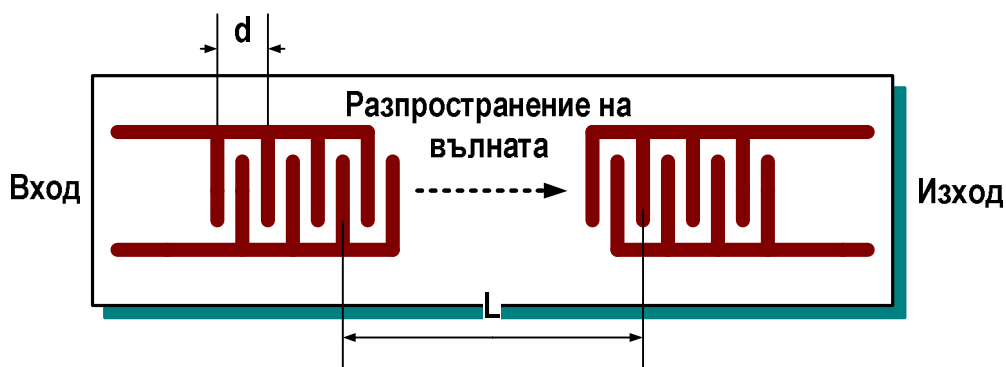
$$\Delta f = -\frac{f_0^2}{N\rho_k S} \Delta m \quad , \quad (10.1)$$

където f_0 е резонансната честота на кварцовия резонатор, N – честотна константа, ρ_k – плътност на пиезоелемента, S – площ на пиезоелемента, Δm – изменение на масата на сорбента.

Големината на изходния сигнал на пиезосорбционния чувствителен елемент се определя от сорбционната активност на използвания сорбент.

Освен на базата на пиезокварцови резонатори, този тип сензори се реализират и на основата на повърхностни акустични вълни (ПАВ - surface acoustic wave - SAW). Принципът им на действие използва също промяната в масата на влагочувствителен слой, реализиран най-често на базата на

полимер. Видът на акустичната вълна се определя от свойствата на пиезоелектричната подложката, кристалния срез и структурата на електродите, които формират излъчвателя и приемника на акустичните вълни (фиг.10.2). Увеличението на диелектричната константа, масата или електропроводимостта на влагочувствителния слой в резултат на абсорбцията на влага води до понижение на скоростта на ПАВ. Промяната в изхода на сензора може да е резултат от промяната на скоростта, честотата или фазата на вълната.



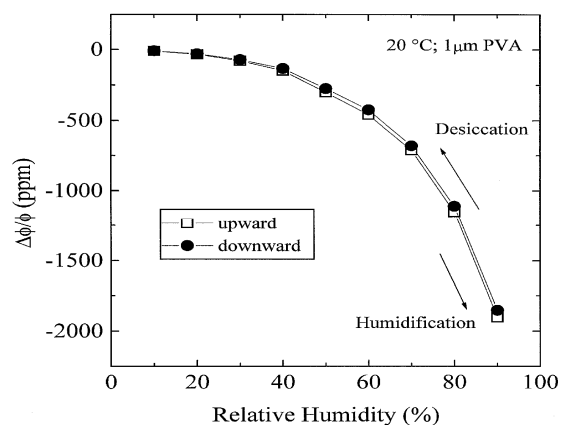
Фиг.10.2. Структура на сензор на базата на ПАВ

Структурата на сензор за влажност на основата на ПАВ, конструиран върху подложка от LiNbO_3 , с нанесен влагочувствителен слой на базата на поливинилов алкохол (PVA), е показана на фиг.10.3а.

Изменението на фазата на изходния сигнал като функция от относителната влажност е показано на фиг.10.3б. Характеристиката е нелинейна с малък хистерезис.



а



б

Фиг.10.3. Структура (а) и характеристика (б) на сензор за влажност на основата на ПАВ с нанесен влагочувствителен слой от поливинилов алкохол

- ***Сорбционно-импедансни сензори за влажност***

Действието на сорбционните импедансни сензори за влажност е основано на зависимостта на пълното съпротивление (импеданса) на влагочувствителния слой от сорбираната влага. В повечето случаи еквивалентната схема на сензори от такъв тип може да бъде представена във вид на паралелно свързани резистор и кондензатор. Пълното съпротивление на тази еквивалентна схема се определя със зависимостта

$$Z = \frac{R}{1+j2\pi fRC} \quad (10.2)$$

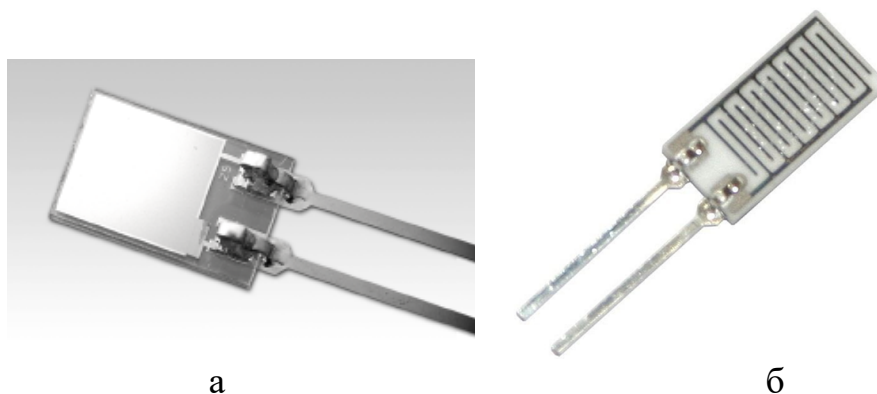
където Z е пълното съпротивление, R и C - активното съпротивление и капацитета на слоя сорбент между електродите, f - честота на захранващото напрежение.

- Сензори с полимерен влагочувствителен слой

Практически всички органични полимерни материали в една или друга степен изменят своите физико-химични свойства при сорбция на влага. Това позволява използването на много от тях в сензори за влажност. Полимерите, използвани като материали за чувствителни елементи за влажност, се класифицират като полиелектролитни и диелектрични. Сензорите, реализирани с тези материали, са от капацитивен, резистивен и пиезорезистивен тип.

В сензорите от диелектричен тип водните молекули се свързват на подходящи места в полимерната мрежа по време на процесите на абсорбция и десорбция. Тъй като диелектричните константи на водата и полимерите са съответно около 80 и 5, водните молекули в полимера влияят на диелектричната му константа. Диелектричната константа се увеличава с увеличаване на количеството водни молекули в полимерите. На тази база се реализират сензори за влажност с конструкция на кондензатор (фиг.10.4а). В резултат на промяна в диелектричната константа на полимера се променя капацитетът на сензора.

Полимери с йонни мономери се класифицират като полиелектролитни. Материалите от йонен тип се характеризират с йонна проводимост, която се увеличава с увеличение на влажността. Причината за този механизъм са йонната подвижност и/или концентрацията на носители на заряд. Когато водата се абсорбира от материала, подвижността на електростатично захванатите йони се повишава, което позволява да има транспорт между съседни места по-свободно и като резултат - съпротивлението намалява. На тази база се реализират резистивни сензори за влажност (фиг.10.4б).



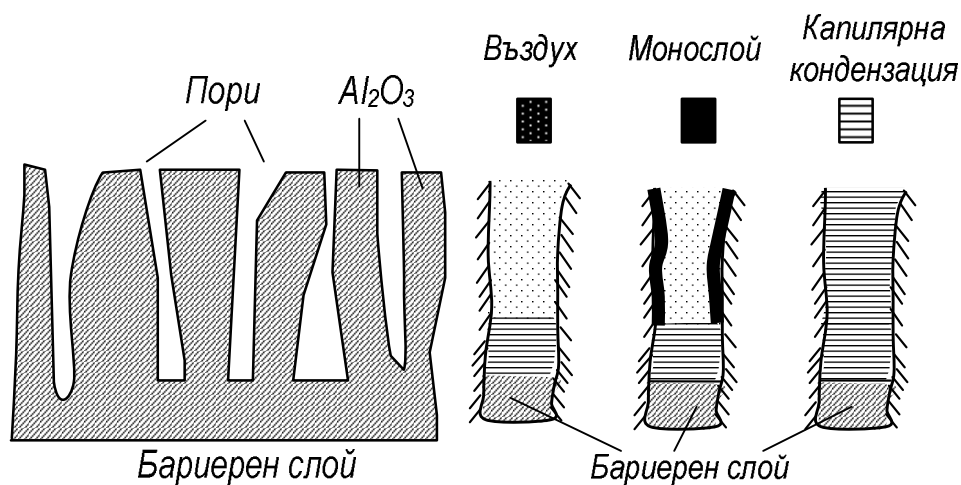
Фиг.10.4. Капацитивен (а) и резистивен (б) сорбционно-импедансен сензор за влажност

Сред многото възможни полимери един често използван материал е полиимидът (polyimide). Причината за това е, че полиимидът е съвместим със съвременните процеси в полупроводниковите технологии.

- Тънкослойни сензори на базата на анодиран Al_2O_3

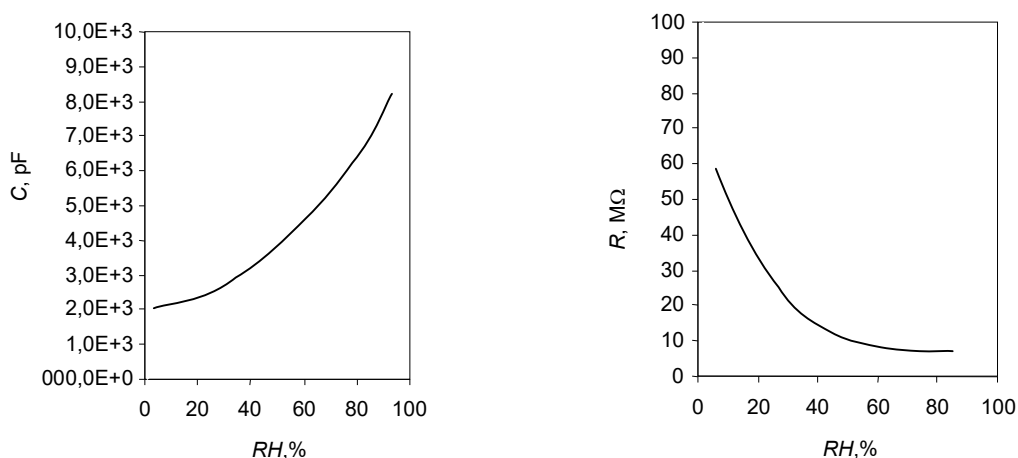
Слоят двуалуминиев триоксид се получава чрез анодно окисляване на чист алуминий. Сензорът се състои от алуминиева подложка, на която чрез метода на електрохимичното окисление е формиран слой Al_2O_3 (фиг.10.5). Като втори електрод служи тънък влагопроницаем слой метал (предимно злато). Първоначално като подложки са използвани алуминиеви пластини, след това алуминиево фолио, а сега се използват тънки ($\sim 1 \mu m$) слоеве алуминий.

Характеристиките на оксидно-алуминиевите сензори основно се определят от свойствата на анодните слоеве Al_2O_3 , които от своя страна силно зависят от състава на електролита и режима на анодиране.



Фиг.10.5. Тънкослоен сензор за влажност на базата на анодиран Al_2O_3

На фиг.10.6 е представена зависимостта на капацитета и активното съпротивление на сензор за относителната влажност.



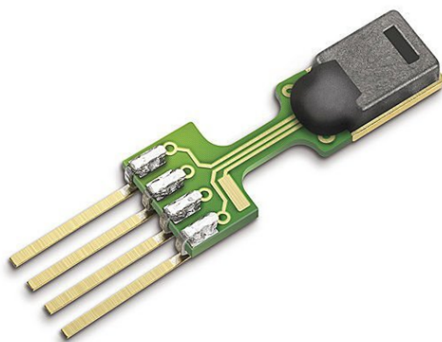
Фиг.10.6. Характеристики на тънкослоен сензор на базата на анодиран Al_2O_3

- Сензори за влажност на основата на порест силиций

Един от начините за получаване на сензори за влажност, за чието изготвяне може да се използват традиционните технологии за интегрални схеми с някои допълнителни технологични процеси, се основава на използването на порест силиций като чувствителен слой. При формирането на порест силиций се използва анодиране. Анодирането може да се извърши в 25% разтвор на флуороводородна киселина (HF), смесен с етанол. След този процес силицият се превръща в порест силиций.

- Сензори за влажност на базата на MOS структури (фиг.10.7)

Предимствата на тези сензори са ниската себестойност, поради изработването им в голям брой с конвенционална технология за изготвяне на интегрални схеми и добра възпроизводимост на параметрите. Като чувствителен елемент може да се използват полимери. Сред тях полиимидът (polyimide) е съвместим със стандартния технологичен процес на производство на интегралните схеми. Чувствителният елемент се реализира върху гейтовата област на MOS транзистора.



Фиг.10.7. Сензор за влажност на базата на MOS структура
(Sensirion AG)

- Сензори за влажност на основата на керамични материали

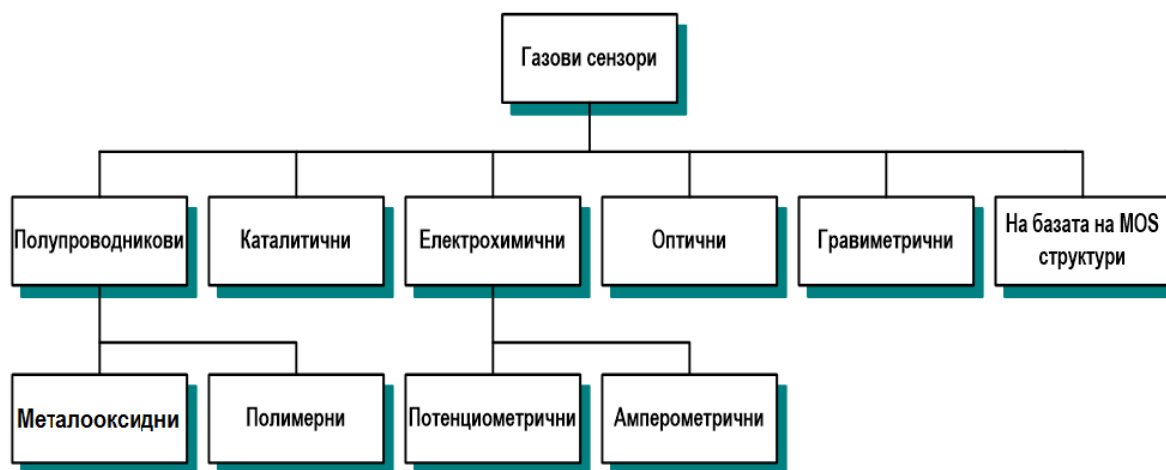
Към тази група се отнасят сензори, в които чувствителният елемент е изготвен от пореста полупроводникова или диелектрична керамика, състояща се от един или композиция от няколко оксида. Керамичните сензори за влажност се класифицират в съответствие с механизмите им на функциониране на йонни, полупроводникови и на базата на твърд електролит.

Предимно се използват йонни сензори, като характеристиката им се определя от зависимостта на съпротивлението от влажността. В зависимост от особеностите при реализацията си, сензорите от този тип се разделят на обемни, дебелослойни и тънкослойни. Обемните керамични сензори се изготвят чрез стандартна керамична технология или нейните модификации. Дебелослойните сензори се изготвят чрез нанасяне на съответна паста върху керамична подложка (основа), най-често от Al_2O_3 . Тънкослойните сензори се реализират на базата на зол-гел технология. След съответните подготвителни операции формираният елемент се синтезира при висока температура.

В сензорите от йонен тип намаляването на пълното съпротивление на чувствителния елемент при увеличаване на относителната влажност е обусловено от физическата адсорбция на повърхността и кондензацията в микрокапилярите на молекули вода. В сензорите от полупроводников тип логаритъмът на проводимостта линейно зависи от логаритъма на водната пара. В този случай молекулите на водата, свързани с повърхността на керамиката от процеса хемосорбция, действат като донорни центрове, отдаващи на керамиката електрони. Основните предимства на керамичните сензори са свързани с механична здравина, устойчивост на химични въздействия, температурна и физическа устойчивост, възможност за работа при по-високи температури.

10.2. Газови сензори

При реализацията на газови сензори се използват няколко физични принципа. Общото при тях е, че съществува възстановяване на чувствителния елемент след въздействието на газа. Броят на материалите и технологиите, на които се базират чувствителните елементи за газови сензори, е значителен. Основните типове газови сензори, които са намерили практическо приложение, са представени на фиг.10.8.



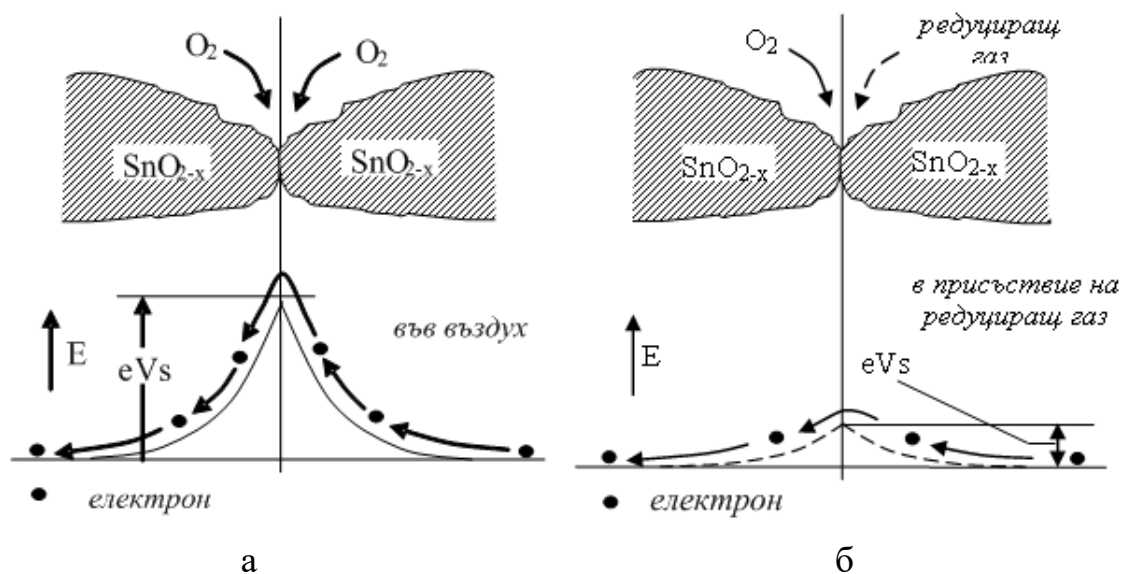
Фиг.10.8. Класификация на газовите сензори

10.2.1. Полупроводникови газови сензори

- **Металооксидни полупроводникови газови сензори**

Като чувствителни материали при металооксидните полупроводникови газови сензори се използват различни металооксидни материали като SnO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , WO_3 , Co_3O_4 и др. Принципът им на действие се основава на увеличаване на проводимостта на чувствителния елемент в приповърхностната област при сорбция на анализирания газ. В зависимост от състава на слоя чувствителен материал сензорът реагира на различни газове като $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CO , CH_4 , H_2 , O_2 и др. Работната температура е в диапазона от 200°C до 500°C .

Металооксидните полупроводникови газови сензори са намерили *промишлена реализация* на базата на *калаен диоксид* с различни легиращи примеси. Принципът им на работа се основава на изменение на съпротивлението им в присъствието на газ. Когато слой метален оксид SnO_2 е нагрят при определена висока температура във въздух, се адсорбира кислород по кристалната повърхност с отрицателен заряд. Формираният повърхностен потенциал служи като потенциална бариера при преминаване на електрони (фиг.10.9а).



Фиг.10.9. Принцип на функциониране на полупроводников газов сензор

В сензора електрически ток тече през частите на свързване (границата на зърната) на микрокристалите SnO_{2-x} . По границите на зърната, адсорбираният кислород формира потенциална бариера, която предотвратява свободното движение на електрони. Електрическото съпротивление на сензора се дължи на тази потенциална бариера. В присъствието на редуциращ газ повърхностната плътност на отрицателно заредения кислород намалява, така че височината на бариерата в границата на зърната намалява (фиг.10.9б). Намалената височина на бариерата намалява съпротивлението на сензора. Скоростта на тези процеси и обратимостта им зависят от температурата, при която работи чувствителният елемент. Вследствие на логаритмичната зависимост между съпротивлението на сензора и концентрацията на газа, металооксидните сензори имат висока чувствителност към газове даже при ниската им концентрация.

Съвременните сензори от този тип се реализират чрез:

- дебелослойни технологии;
- тънкослойни технологии.

На изолираща подложка от алуминиев оксид се нанасят платинени контакти, а върху тях се нанася слой на чувствителния материал. На обратната страна на подложката се формира тънкослоен резистивен нагревател от платина. Сензорът може да работи при различни режими, като най-често използваният е измерване на съпротивлението при постоянна температура. Другият режим е модулиране на температурата и измерване на съпротивлението при различни температури. Селективността на този тип сензори се подобрява чрез използване на филтри и легиране на чувствителния елемент с различни материали. На фиг.10.10 са показани

металооксидни полупроводникови газови сензори, предлагани от фирмата FIGARO Engineering Inc.



Фиг.10.10. Металооксидни полупроводникови газови сензори (FIGARO Engineering Inc.)

- ***Полимерни полупроводникови газови сензори***

Като чувствителни елементи се използват слоеве на основата на фталоцианини (phthalocyanines), притежаващи висока термична и химична устойчивост. Тези слоеве са полупроводници от р-тип и голямо влияние на проводимостта им оказва кислородът във въздуха. Проводимостта на слоевете се променя в присъствието на газове. Чувствителността на сензорите се увеличава при легиране на слоевете с атоми на тежките метали.

10.2.2. Каталитични газови сензори

На повърхността им в резултат на протичане на каталитични реакции се отделя топлина, водеща до промяна на температурата в газовия сензор, която се измерва с температурен сензор. Те се наричат още пелистори. В пластина от оксиден материал се вгражда платинена намотка. Чувствителният оксиден материал се покрива с порест катализатор от платина или паладий. Намотката изпълнява ролята на нагревател и на резисторен температурен сензор. Когато изследваният газ влезе в реакция, на каталитичната повърхност на сензора се извършва отделяне на топлина, повишаваща температурата на пластината и вградената в нея намотка. В резултат на това съпротивлението на намотката нараства, което се регистрира от електронна схема.

10.2.3. Електрохимични газови сензори

Те са едни от най-универсалните сред газовите сензори. В зависимост от принципа им на действие, електрохимичните газови сензори се разделят на ***потенциометрични*** и ***амперометрични***. В конструкцията на всеки електрохимичен сензор има минимум два електрода (анод и катод), между които протича химична реакция. Електродите се изготвят от каталитични метали като платина и паладий.

- ***Потенциометрични сензори***

Основават се на влиянието на концентрацията на реагентите върху равновесието на окислително-възстановителните реакции, протичащи в електрохимична клетка на границата електрод-електролит. Измерването на потенциала на клетката на сензора се извършва практически при нулев ток, за което е необходимо използването на измервателен уред, притежаващ много висок входен импеданс.

- ***Амперометрични сензори***

При тях големината на тока през сензора зависи от концентрацията на газа в изследваната среда, проникващ през мембрана. Амперометричният метод е в основата на работа на газови сензори на базата на твърди електролити, които се използват за определяне на съдържанието на кислород и серни оксиди. Като електролит се използва циркониев диоксид с различни легиращи добавки.

Тези сензори се произвеждат като обемни керамични или като дебелослойни и тънкослойни елементи. Чувствителният елемент (твърдият електролит) работи при температури над 300°C.

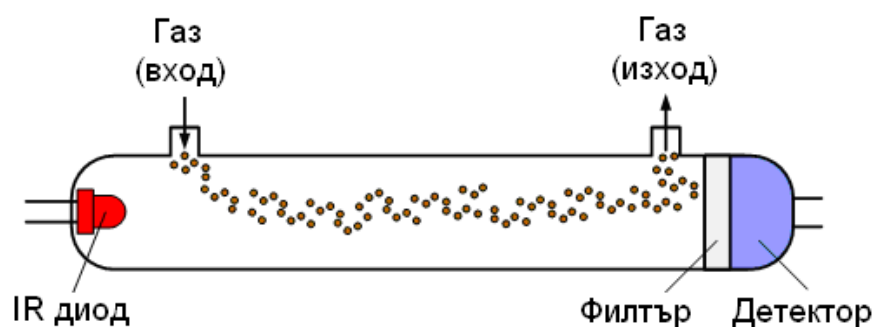
10.2.4. Оптични газови сензори

Основават се на взаимодействието на електромагнитните вълни с изследвания газ, в резултат на което се изменят някои характеристики на излъчването като интензивност, поляризация и др. Оптичните газови сензори могат да се разделят на няколко основни групи.

- ***Оптоелектронни сензори***, представляващи комбинация от източник на светлина (светодиод, полупроводников лазер) и фотоприемник (фотодиод, фототранзистор), между които се намира оптична прозрачна среда.

На фиг.10.11 е показана структурата на оптичен газов сензор от този тип, а на фиг.10.12 – външният му вид.

Изменението на оптичните свойства на средата под действие на изследвания газ влияе на изходния сигнал от фотоприемника, който се използва за измерване на концентрацията на газа.



Фиг.10.11. Структура на оптичен газов сензор



Фиг.10.12. Вид на оптичен газов сензор

- Сензори на основата на оптични влакна

В тях светлината между източника и приемника се разпространява по оптично влакно, свойствата на което зависят от концентрацията на изследвания газ.

Съществуват още:

- сензори на основата на ултравиолетова и луминисцентна спектроскопия;
- сензори на основата на инфрачервена и Raman спектроскопия;
- сензори на основата на повърхностен плазмен резонанс.

10.2.5. Гравиметрични сензори

Това са сензори, в които много малки изменения на масата, предизвикани в резултат на адсорбция на молекули на газове, довеждат до изменение на механичните свойства на системата. В тях не протичат химични реакции и принципът им на действие е чисто физичен. Генераторите на основата на пиезоелектрически кристали са извънредно чувствителни към изменението на масата на електродите им. За да се реализира газов сензор на тяхна база е необходимо да се осигури

адсорбция на молекули от изследвания газ на повърхността на електродите чрез нанасяне на тънък слой адсорбиращ материал. Така при нарастване на концентрацията на изследвания газ в средата се увеличава масата му, адсорбирана на повърхността на пиезокристал. Пропорционално с това се намалява честотата на изходния сигнал на генератора.

10.2.6. Газови сензори на основата на MOS-структури

MOS-структури, металните електроди на които са реализирани от преходни метали (паладий, платина, никел), изменят характеристиките си под действие на газове. При това при MOS-транзисторите се изменя праговото напрежение и се измества волт-амперната характеристика. При MOS-кондензаторите се извършва изместване на волт-фарадната характеристика по оста на напрежение, без да се изменя формата ѝ. Тези ефекти се използват за реализиране на газови сензори с различни конструкции (с перфориран гейт, с разцепен гейт и др.).

ГЛАВА 11. СЕНЗОРНИ ИНТЕРФЕЙСИ

Сензорите са елементи на автоматизацията, които се използват като градивни елементи на по-сложни системи. Тези системи се управляват от компютри или програмируеми логически контролери (PLC), които получават информация от сензорите посредством аналогов или цифров интерфейс.

В зависимост от типа на преносната среда, използваните в интелигентните сензори интерфейси най-общо могат да се разделят на две групи – жични и безжични. В зависимост от типа на сигнала биват с аналогов, с честотен и с цифров сигнал на изхода.

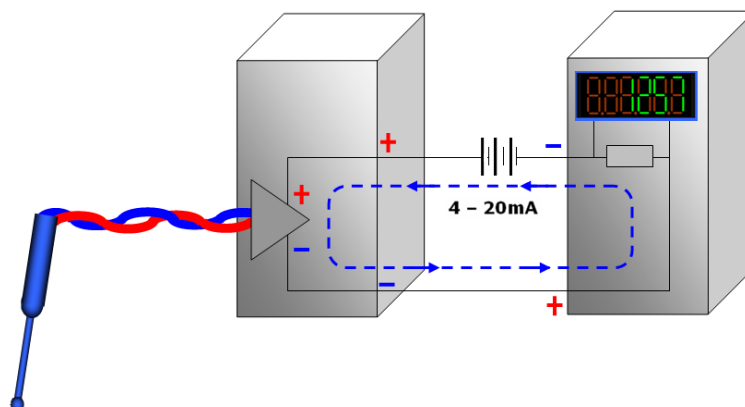
11.1. Напреженов изход

При този тип сензори изходният сигнал на сензора представлява напрежение, което се променя с изменението на входния сигнал на сензора. Като недостатък на сензорите с напреженов изход може да се посочи, че сигналът не може да бъде предаван на големи разстояния, тъй като има пад на напрежението върху проводниците, както и нараства влиянието на шумовете, които се индуцират и се наслагват върху сигнала. Шумовете могат да се появят от намиращите се наблизо мотори, контактори и друг тип електромеханично оборудване. Те имат негативно влияние върху точността на измерванията и често се налага да бъдат премахнати или намалени в момента на измерване, като за целта се прилагат съответните аналогови или цифрови филтри.

11.2. Токов кръг (current loop)

Токовият кръг (фиг.11.1) представлява интерфейс, при който изходът на сензора генерира ток, който се променя в зависимост от промяната на измерваната величина. За разлика от сензорите с напреженов изход, при токовия кръг показанието на сензора може да се предава на по-голямо разстояние и в по-малка степен да е зависим от смущения. Разработени са различни стандарти за токов кръг, но най-широко приложение намира стандартът 4-20 mA. При него най-малката стойност от обхвата на сензора съответства на 4 mA ток, а най-голямата - на 20 mA. Останалите показания на сензора се мащабират в границите между 4 mA и 20 mA. Интерфейсът гарантира, че винаги по линията ще протича ток. По този начин устройствата, към които са свързани сензори с такъв интерфейс, когато няма протичане на ток, лесно могат да открият, че съществува проблем със сензора (например, прекъсната линия). Преобразуването на сигнала в напреженов става лесно - поставя се резистор 250 Ω , като падът на напрежението върху него се изменя в границите до 5 V и лесно може да бъде измерено от PLC контролер или от измервателно (DAQ-data

acquisition) устройство.



Фиг.11.1. Токов кръг 4-20 mA

На базата на 4-20 mA интерфейса е реализиран HART протокола за обмен на данни със сензори. При него се реализира обмен на цифрова информация посредством наслагване на цифровите данни върху аналоговия сигнал.

11.3. Честотен сигнал и широчинно-импулсна модулация (PWM – Pulse Width Modulation)

Сензорите с честотен изход могат да се определят като квази-цифрови сензори, като изходът им е честота, период, коефициент на запълване, времеви интервал, фазово отместване. Сензорите с честотен изход се характеризират със следните предимства:

- висока устойчивост на шумови смущения. В сравнение с аналоговите сигнали, честотните сигнали могат да се предават на по-големи разстояния като запазват добра шумоустойчивост и са изключително подходящи за индустриални приложения и приложения в средата на високи смущения;
- запазване на енергията при предаване. За разлика от сензорите с аналогов изход, тези с честотен изход запазват енергията на сигнала при предаване на големи разстояния, без да се нуждаят от предварително усилване;
- висока точност при измерването на честотен сигнал. Постига се на базата на широко разпространените кристални резонатори, които на практика са по-стабилни от съответстващите им източници на опорно напрежение при измерването на аналогови сигнали.

В сравнение със сензорите с напреженов изход, сензорите с честотен изход не изискват допълнителни компоненти като аналогово-цифрови преобразуватели (АЦП) за измерване на сигнала. Грешката им при преобразуване на честота в цифров код е пренебрежимо малка (от

порядъка на 0,001%). Самото преобразуване на измерваната величина в честотен сигнал може да се разглежда като процес на интегриране във времето, при който се филтрират евентуални шумове.

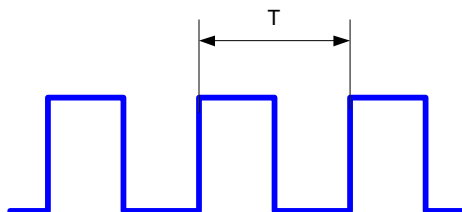
11.3.1. Сензори с честотен изход

Стойностите на честота и периода на периодичните сигнали са реципрочни, като съотношението между тях се дава със зависимостта

$$f = \frac{1}{T}, \quad (11.1)$$

където f е честотата, а T – периодът. Единицата за измерване на честота, определена в SI, е херц - Hz (hertz). Единицата за период е секунда (s).

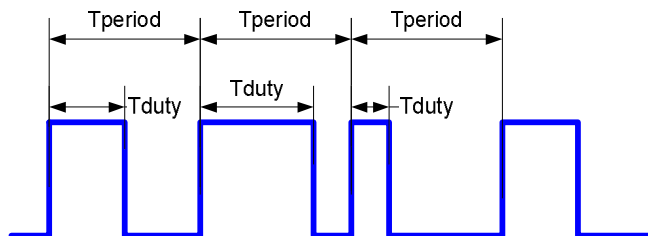
Най-често сигналът на сензорите с честотен изход е правоъгълно изменящ се (square wave) (фиг.11.2), като честотата му се променя в зависимост от входния сигнал на сензора. По стойността на генерираната честота се съди за състоянието на измерваната величина.



Фиг.11.2. Правоъгълен сигнал

11.3.2. Сензори с изход с широчинно-импулсна модулация (PWM – Pulse Width Modulation)

При този тип сензори изходният сигнал представлява правоъгълен сигнал (фиг.11.3), при който се променя коефициентът на запълване (duty factor). Промяната на коефициента на запълване носи информация за измерената от сензора стойност.



Фиг.11.3. Широчинно-импулсна модулация

11.4. Цифрови интерфейси

11.4.1. AS интерфейс

AS-интерфейсът (Aktuator Sensor Interface) е предназначен за свързване на сензори и изпълнителни устройства към контролери на най-ниско ниво. Той е мрежов протокол на ниво сензори и изпълнителни устройства, който се поддържа от почти всички водещи фирми в областта на индустриалната автоматизация.

Включването на сензорите към AS мрежата се извършва чрез специални входно-изходни блокове. AS-интерфейсът може да предава не само дискретни, но и аналогови сигнали. Разпознаването на типа на сигнала се извършва автоматично от входно-изходния блок.

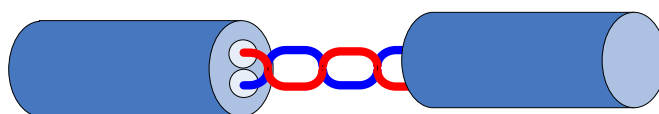
Максимално допустимата дължина на кабела при AS мрежата е 100 m. Тя може да бъде увеличена до 300 m при използване на повторители. Към AS-интерфейса могат да бъдат присъединени до 31 възела или подчинени устройства. Подчинени могат да бъдат AS интерфейсни модули за включване на дискретни или аналогови сензори или сензори с вграден чип на AS-интерфейс. Всеки възел има 4 информационни бита. По такъв начин към един модул на AS-интерфейса могат да бъдат включени до 4 дискретни сензора или изпълнителни устройства. Така има възможност да се свържат до 124 сензора или изпълнителни устройства.

AS-интерфейсът работи по принципа „управляващ-управяван” (Master-Slave). Контролерът е модулът Master. Сензорите и изпълнителните устройства са Slave устройства, които се управляват от Master устройството.

Съществена особеност на AS-интерфейса е използването на един и същи двупроводен кабел както за предаване на информация, така и за електрозахранване. При интерфейса се използва метод за модулация на сигналите, наречен алтернативно-импулсна модулация.

11.4.2. Интерфейси на базата на RS-485

Стандартът RS-485 е широко разпространен интерфейс за събиране на данни и управление, позволяващ връзката на множество устройства по обща шина. Предаването на данни се осъществява като се използват диференциални сигнали по две линии (А и В). За да се повиши шумоустойчивостта се използва кабел от тип “усукана двойка (twisted pair)” (фиг.11.4).



Фиг.11.4. Кабел „усукана двойка”

Благодарение на възможността да се свързват по обща шина множество приемо-предаватели, RS-485 е предпочитан интерфейс за комуникация в индустриалните системи и в частност - за свързване на сензори.

Стандартно е възможно да се свържат до 32 устройства (при някои типове RS-485 приемо-предавателни модули - и по-голям брой) към една обща шина, като в определен момент от време само едно устройство е предавател, а всички останали са приемници. Устройствата се свързват на обща шина, като в двата края на шината се поставят терминиращи резистори.

Върху стандарта RS-485 се базират множество комуникационни протоколи от по-високо ниво като Modbus, широко използвани в автоматизацията.

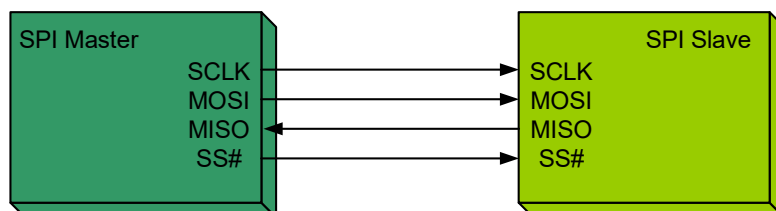
11.4.3. CAN интерфейс

CAN протоколът първоначално е разработен за нуждите на автомобилостроенето, но впоследствие намира широко приложение в индустрията за нуждите на автоматизация на производството. Той е сигурен протокол за обмен на данни, като отделните устройства в мрежата предават съобщения, при които специален идентификатор на съобщението определя неговия приоритет. Устройствата се свързват към обща шина (bus). За избягване на така наречените колизии (това е събитие, при което две устройства започват да предават по едно и също време) се използва механизъм на работа CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). При него устройствата следят дали мрежата е свободна и ако няма предаване на друго съобщение - започват своето изпращане. Ако в същия момент започне и друго устройство да предава се извършва така нареченото побитово арбитражиране на шината – устройството, предаващо логическа нула, печели арбитражирането, докато устройството, опитващо се да предаде логическа единица, прекратява предаването и изчаква шината да бъде отново освободена. На базата на CAN протокола е създаден протокола от по-високо ниво CANopen, който позволява свързването на сензори и други устройства от различни производители.

11.4.4. SPI и I²C интерфейси за сензорите в интегрално изпълнение

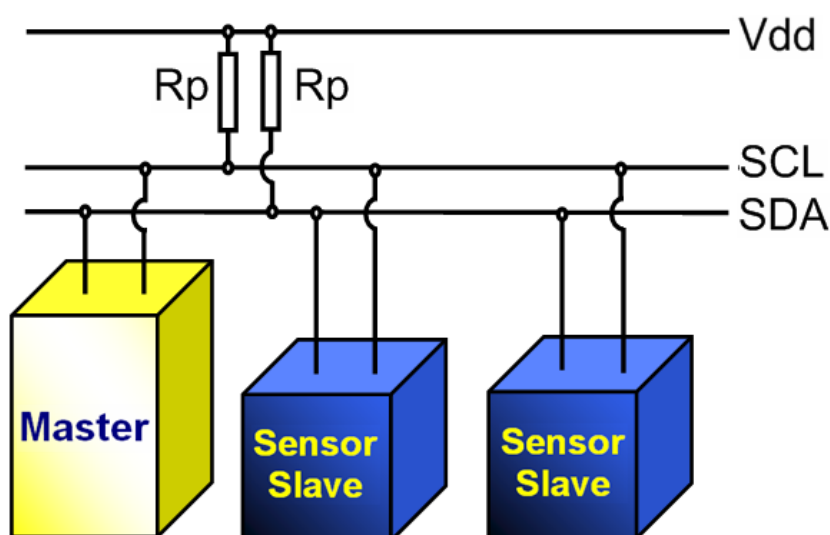
Този тип интерфейси се използват при сензори в интегрално изпълнение (реализирани като интегрални схеми) или при сензори, за които се предвижда да бъдат монтирани върху печатна платка. При двата интерфейса има едно главно (master) устройство и свързани с него едно или повече подчинени (slave) устройства. Главното устройство стартира комуникацията, избира подчиненото устройство, с което ще обменя данни, и управлява тактовия сигнал.

При SPI интерфейса комуникацията се осъществява посредством четири линии: MISO – master input – slave output; MOSI – master output-slave input; SCLK – serial clock; SS – slave select (с активно ниско ниво). Начинът на свързване на едно главно и подчинено устройство е показан на фиг.11.5.



Фиг. 11.5. SPI интерфейс

I²C интерфейсът използва две линии за сериен обмен на информация: SDA – serial data и SCL – serial clock (фиг.11.6). Към двете линии задължително се свързват така наречените изтеглящи (pull-up) резистори към захранващото напрежение.



Фиг. 11.6. I²C интерфейс

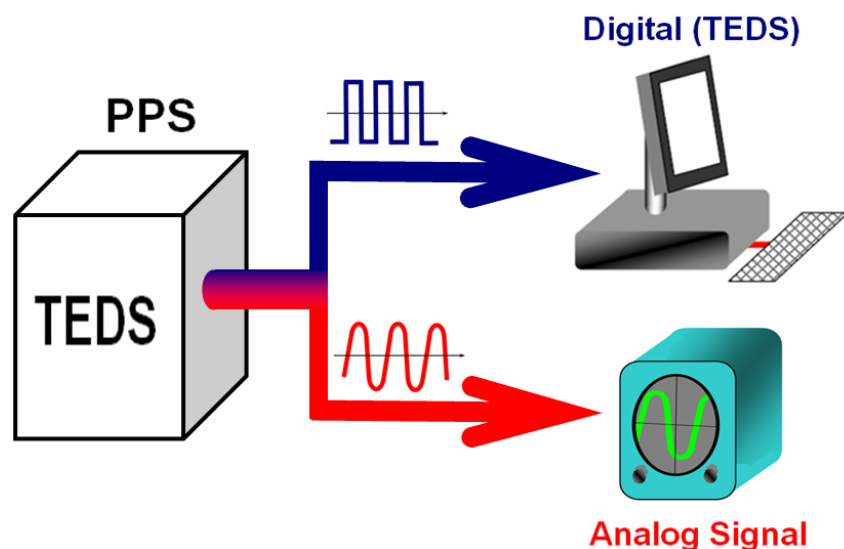
11.4.5. IEEE 1451.4

IEEE 1451.4 е един от стандартите, разработени да описват начина на свързване на интелигентни сензори. IEEE 1451.4 дефинира няколко важни елемента на интелигентните сензори, отнасящи се до принципа им на работа и до техния интерфейс.

Основната идея на стандарта е възможността сензорът да съхранява информация за самия него, която да улесни използването му. Информацията, която се съхранява в самия сензор, касае данни за типа на сензора, серийния му номер, обхвата на измерванията, датата на последното калибриране и др. Тази информация се намира в EEPROM

памет в сензора, като е организирана в така наречените TEDS – Transducer Electronic Data Sheets.

Стандартът IEEE 1451.4 (фиг.11.7) запазва аналоговия сигнал от сензора, като същевременно добавя възможност за серийна цифрова връзка за четене на данните, записани в TEDS.



Фиг.11.7. IEEE 1451.4 интерфейс

11.4.6. ZigBee

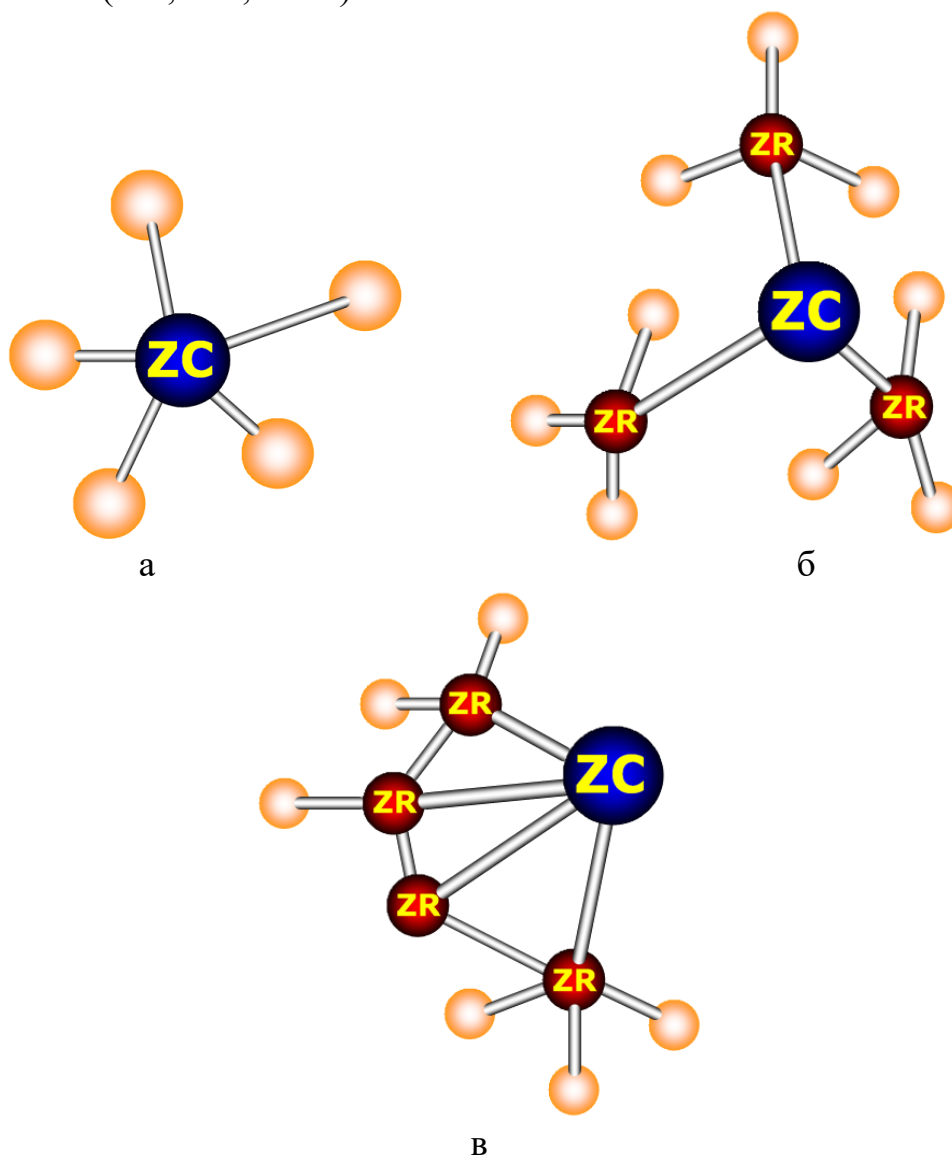
В търсене на надеждни системи за мониторинг и контрол, използващи безжична комуникация, е създаден стандартът ZigBee. Като надстройка на стандарта IEEE 802.15.4, той дефинира мрежов слой, слой за сигурност и потребителски слой. Чрез него се опростява разработката на безжични устройства и се постига възможност за комуникация между продукти на различни производители.

Стандартът IEEE 802.15.4 специфицира физическия и каналния слоеве за множество радиочестотни ленти, включително 868 MHz, 915 MHz и 2,4 GHz. Стандартът е разработен, за да се предоставя надеждна комуникация с ниска консумация на енергия. IEEE 802.15.4 е пакетен протокол. ZigBee разширява възможностите на този нов радиостандарт, дефинирайки гъвкав и надежден мрежов слой, който поддържа разнообразие от архитектури, за да се постигне надеждна безжична комуникация.

В стандарта са дефинирани три типа устройства, които се включват в една ZigBee мрежа: ZigBee coordinator – ZC; ZigBee router – ZR и ZigBee End Device – ZED. Във всяка мрежа има един ZigBee координатор, който на практика изгражда мрежата, асоциира или изключва устройства. ZigBee маршрутизаторът има възможност да маршрутизира съобщения от съседните му устройства в мрежата към други устройства. Крайните

устройства при ZigBee не могат да маршрутизират съобщения, но пък от своя страна те могат да бъдат устройства на батерийно захранване, които се включват към мрежата за кратко време, обменят информация с други устройства в мрежата и преминават в режим на намалена консумация. Сензорите със ZigBee интерфейс основно работят като крайни устройства и са приспособени за батерийно захранване.

ZigBee поддържа три типа мрежови архитектури (фиг.11.8) – звезда, дърво и клетка (star, tree, mesh).



Фиг.11.8. ZigBee мрежови архитектури

Основно предимство на стандарта ZigBee е възможността на негова база да се изграждат безжични мрежи от сензори.

ЛИТЕРАТУРА

1. Електрически измервания. Под редакцията на А. Н. Балтаджиев. София, Техника, 1977.
2. Електрически измервания. Под общата редакция на Б. Матраков. София, Техника, 1999.
3. Ненова, З. Измерване на неелектрически величини. Виртуални лабораторни упражнения. Габрово, Екс-Прес, 2013.
4. Ненова, З., С. Иванов, Т. Ненов. Сензори в индустриалната автоматизация. Габрово, Екс-Прес, 2011.
5. Трендафилов, Г. Измерване на неелектрически величини. Ръководство за лабораторни упражнения. Габрово, Университетско издателство „Васил Априлов”, 2005.
6. Alciatore, D. G. Introduction to mechatronics and measurement systems. Fourth Edition. McGraw-Hill, New York, 2012.
7. Ash, G. Les capteurs en instrumentation industrielle. Bordas, Paris, 1991 (in French).
8. Chen, Z., C. Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. Sensor Letters, 2005, Vol. 3, 274–295.
9. Dao, R. Mechanical Shock Test Report: Accelerometer Model MXR7202ML. MEMSIC Application Note. 2003. Available online: <http://www.memsic.com>.
10. David, S. N. Linear Position Sensors. Theory and Applications. John Wiley&Sons, Inc., Publ., New Jersey, 2004.
11. Dunn, W. C. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control. McGraw-Hill, Inc., New York, 2005.
12. Dunn, W. C. Introduction to instrumentation, sensors, and process control. Artech House, Inc., Norwood, 2006.
13. Eren, H. Wireless sensors and instruments: networks, design, and applications. CRC Press, Boca Raton, 2006.
14. Farahani, H., R. Wagiran, M. N. Hamidon. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. Sensors 2014, 14, 7881-7939.
15. Fraden, J. Handbook of modern sensors: Physics, designs and application. Fifth Edition. Springer-Verlag Inc., New York, 2016.
16. Frank, R. Understanding smart sensors. Second Edition. Artech House, Inc., Norwood, 2000.
17. Fundamentals of instrumentation and measurement. Edited by D. Placko. ISTE Ltd, London, 2007.
18. Gas Sensing Fundamentals. C.-D. Kohl, T. Wagner (Eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
19. Janata, J. Principles of Chemical Sensors. Springer-Verlag, 2009.

20. Johnson, C. D. Process Control Instrumentation Technology. Eighth Edition. Pearson Education Limited, Essex, 2014.
21. Kalantar-zadeh, K. Sensors. An Introductory Course. Springer Science+Business Media New York. 2013.
22. Kuphaldt, T. R. Lessons In Industrial Instrumentation. Creative Commons, San Francisco 2017.
23. Liu, S., R. Zhu. Micromachined Fluid Inertial Sensors. *Sensors* 2017, 17, 367; doi:10.3390/s17020367.
24. Liu, X., S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, H. Ning. A Survey on Gas Sensing Technology. *Sensors* 2012, 12, 9635-9665.
25. Luo, S., J. Bimbo, R. Dahiya, H. Liu. Robotic Tactile Perception of Object Properties: A Review. (<https://arxiv.org/pdf/1711.03810.pdf>).
26. Malaric, R. Instrumentation and measurement in electrical engineering. BrownWalker Press, Boca Raton, 2011.
27. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Edited by John G. Webster and Halit Eren. Second Edition. CRC Press. Boca Raton, 2014.
28. Modern Sensors Handbook. Edited by Pavel Ripka, Alois Tipek. ISTE Ltd, London, 2007.
29. Monitoring Atmospheric Water Vapour. Ground-Based Remote Sensing and In-situ Methods. Niklaus Kämpfer (Ed.), Springer-Verlag, New York, 2013.
30. Mukhopadhyay, S. C. Intelligent Sensing, Instrumentation and Measurements. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2013.
31. MXR9500G/M Datasheet. Available online: www.memsic.com.
32. Nenov, T., S. Yordanov. Ceramic Sensors: Technology and Applications. CRC Press. Boca Raton, 1996.
33. Passaro, V. M. N., A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo, C. E. Campanella. Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective. *Sensors* 2017, 17, 2284.
34. Process/industrial instruments and controls handbook. Editor-in-Chief: Gregory K. McMillan. Late Editor-in-Chief: Douglas M. Considine, 5th Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1999.
35. Rakočević, G. Sensors. In “Application and Multidisciplinary Aspects of Wireless Sensor Networks. Concepts, Integration, and Case Studies”. Gavrilovska, L., Krco, S., Milutinovic, V., Stojmenovic, I., Trobec, R. (Eds.). Springer-Verlag London, 2011, pp.13-31.
36. Scott, M. Industrial process sensors. CRC Press, Boca Raton, 2008.
37. Sensor Technology Handbook. Edited by J. Wilson, Elsevier Inc., Oxford, 2005.
38. Sensors, Focus on Tactile, Force and Stress Sensors. Edited by Jose Gerardo Rocha and Senentxu Lanceros-Mendez. In-tech, Vienna, 2008.
39. Smart sensor systems. Edited by Gerard C.M. Meijer. John Wiley & Sons, Ltd., 2008.

40. Solomon, S. Sensors and Control Systems in Manufacturing, McGraw-Hill Inc., New York, 2010.
41. Solomon, S. Sensors Handbook. McGraw-Hill Inc., New York, 2010.
42. Temperature Sensor Handbook. National Semiconductors Corp., 1995.
43. The mechatronics handbook. Edited by R.H. Bishop. CRC Press. Boca Raton, 2002.
44. Thermal Sensors. Principles and Applications for Semiconductor Industries. Ch. Jha (Ed.), Springer-Verlag New York, 2015.
45. White, R. M. A Sensor Classification Scheme. IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. UFFC-34, No. 2, 1987, pp. 124-126.